Aus dem Physiologischen Institut, Lehrstuhl II
der Universität Düsseldorf
Direktor: Professor Dr. J. Haase

TRENNLINIEN-DISTINKTIBILITÄT UND TRITANOPISCHE BUNTSÄTTIGUNG

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der
Universität Düsseldorf

vorgelegt
von
Wolfgang Thoma

Düsseldorf
1982

Aus dem Physiologischen Institut, Lehrstuhl II
der Universität Düsseldorf
Direktor: Professor Dr. J. Haase

TRENNLINIEN-DISTINKTIBILITÄT UND TRITANOPISCHE BUNTSÄTTIGUNG

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der
Universität Düsseldorf

vorgelegt
von
Wolfgang Thoma

Düsseldorf
1982

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

Der Dekan
der Medizinischen Fakultät
der Universität Düsseldorf

gez.: Prof.Dr. Arnold

Referent
gez.: Prof.Dr. Scheibner

Korreferent
gez.: Prof.Dr.Dr. Jansen

Meinen Eltern gewidmet

INHALTSVERZEICHNIS Seite

1. Einleitung 1
2. Theoretische Grundlagen 6
2.1. Farbe, Farbreiz, Farbvalenz; Spektralwertfunktionen; Farbdreieck, Farbtafel 6
2.2. Helligkeit, Leuchtdichte; ABNEYsches Gesetz, Leuchtdichtebeiwerte, Alychne; Helligkeitskriterien 16
3. Aufgabenstellung 20
4. Methodik und Versuchsdurchführung 22
4.1. Versuchsperson 22
4.2. Apparatur 23
4.3. Wechsel des Bezugsystems 27
4.3.1. Transformationseigenschaften 27
4.3.2. Transformationen aus dem instrumentellen Primärvalenzsystem in das WRIGHTsche (B,G,R)-System (Kalibrierung des Dreifarben-Meßgerätes, DFM) 28
4.3.3. Transformationen aus dem WRIGHTschen (B,G,R)-System in das (X,Y,Z)-Normvalenzsystem CIE 1931 31
4.4. Helligkeitsabgleiche nach dem Kriterium "Minimale Trennliniendeutlichkeit" (Minimally Distinct Border) und dem Direktvergleich-Kriterium 34
4.4.1. Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte über direkten Abgleich der einzelnen Primärvalenzen mit einem Testreiz 34
4.4.1.1. Meßvorgang 35

Seite

4.4.1.2. Berechnung der Leuchtdichtebeiwerte 36
4.4.1.3. Fehlerrechnung 39
4.4.2. Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte über die Messung zweier leuchtdichtefreier Quervektoren im Farbenraum 40
4.4.2.1. Meßvorgang 44
4.4.2.2. Berechnung der Leuchtdichtebeiwerte 45
4.4.2.3. Fehlerrechnung 48
4.5. Bestimmung von Farbreizen, die im Helligkeitsvergleich zu vorgegebenen Farbreizen minimale Trennliniendeutlichkeit ergeben 50
4.6. Bestimmung der Spektralwertfunktionen 53
4.7. Bestimmung der Hellempfindlichkeitsfunktion unter Verwendung des MDB-Kriteriums 55
4.8. Bestimmung der Schätzfunktion der spektralen Distinktibilität 56
5. Ergebnisse 57
5.1. Spektralwertfunktionen 57
5.2. Hellempfindlichkeitsfunktion 61
5.3. Heterochrome Helligkeitsabgleiche nach dem MDB- und dem DV-Kriterium;Leuchtdichtebeiwerte 63
5.3.1. Farbwerte des Testreizes $\vec{C}_o$ 63
5.3.2. Ergebnisse des Abgleichs der einzelnen Primärvalenzen 64
5.3.3. Ergebnisse der Bestimmung leuchtdichtefreier Quervektoren 69
5.3.4. Vergleich der beiden Methoden und Kriterien nach Anwendung der

Seite

Leuchtdichtebeiwerte auf die Spektralwertfunktionen; Vergleich mit der gemessenen Hellempfindlichkeitsfunktion 78

5.4. Einfluß von Erregungsunterschieden im blau-gelben Übertragungskanal auf die Trennliniendeutlichkeit 83

5.5. Zusammenhang zwischen tritanopischer Sättigungsfunktion und spektraler Distinktibilität 88

5.5.1. Aufstellung der tritanopischen Sättigungsfunktion 88

5.5.2. Ergebnisse der spektralen Distinktibilitätsschätzung mit der tritanopischen Sättigungsfunktion 98

6. Diskussion 99

6.1. Spektralwertfunktionen, Hellempfindlichkeitsfunktion 99

6.2. Heterochrome Helligkeitsabgleiche, Meßunsicherheit und Reliabilität 101

6.3. Additivität, Vergleich beider Abgleichkriterien 104

6.4. Einfluß der Wahl der Vergleichsreize auf die Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte 108

6.5. Modell der Hellempfindung (chromatische Helligkeit) 109

6.6. Spatiales Auflösungsvermögen 115

6.7. Ausblick 119

7. Zusammenfassung 121

8. Schrifttum 123

1. Einleitung

Die vorliegende Untersuchung befaßt sich mit Problemen des Bereichs von Farbempfindung und Helligkeitsempfindung. Dabei wird auf einen festen Bezugsrahmen zurückgegriffen, der durch die Grundlagen der Farbmetrik vorgegeben ist und sowohl die Methode als auch die Form der Ergebnisse bestimmen wird. Dies sei betont, um Mißverständnisse zu vermeiden, die in der Diskussion über Farbphänomene immer wieder auftreten. Wie sich im Laufe der Farbforschung gezeigt hat, erfährt nämlich gerade der Farbbegriff durch die Ausrichtung auf unterschiedliche Verstehenshorizonte die verschiedensten inhaltlichen Ausprägungen. Man denke nur an die differenten Aussageweisen der physikalischen, physiologischen und psychologischen Forschung. Streit entsteht gerade dadurch, daß einzelne Fachdisziplinen den Anspruch erheben, ihre Zugangsweise sei diejenige mit der größten Realitätsbezogenheit, weshalb ihr gegenüber allen anderen der generelle Vorzug einzuräumen sei. Obersehen wird dabei jedoch, daß mit dem jeweils veränderten Vorverständnis nicht nur ein und dasselbe Objekt unter verschiedenen - vielleicht konkurrierenden - Aspekten beleuchtet wird, sondern daß die Entität "Farbe" selbst immer zugleich einer inneren Veränderung unterworden ist. Physikalische, psychologische aber auch künstlerische Analyse bedeuten nicht einfach unterschiedliche Annäherung an ein und denselben Gegenstand, sondern immer zugleich Konstitution eines je eigenen Realitätsbereichs, der sich mit den anderen Bereichen möglicherweise als inkompatibel erweisen kann. Die Objektivität jeglicher Farbforschung liegt demnach nicht alleine in einer wie auch immer aufzufassenden größeren Realitätsnähe, sondern in der stetigen und bewußten Reflexion auf den Bezugsrahmen hin, der die Zugangsweise, aber auch die Aussageform der einzelnen Fachdisziplinen immer notwendiger-

weise prägt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird Farbe als die Gesichtsempfindung aufgefaßt, durch die sich zwei aneinandergrenzende strukturlose Teile des Gesichtsfeldes bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge allein unterscheiden können (17). Farbmessung besteht im optischen Vergleich elektromagnetischer Strahlung untereinander,wobei die niedere Farbmetrik (SCHRÖDINGER (69)) ausschließlich Urteile über Gleichheit und Ungleichheit der durch die Strahlung hervorgerufenen Sinnesempfindung verwertet, während etwa Fragen des Farbabstandes, also Probleme der quantitativen Unterschiede von Empfindungen, der höheren Farbmetrik zugeordnet werden. Der Bewußtseinsinhalt, der mit dem Farbeindruck verbunden ist, und damit auch die erlebnismäßige Wirkung auf das empfindende Subjekt werden nicht thematisiert.

Die experimentellen Untersuchungen der Arbeit sollen der Frage nachgehen, welchen Einfluß gewisse Farb- und Helligkeitsdifferenzen zwischen zwei eng benachbarten Feldern auf die Deutlichkeitsausprägung der Trennlinie ausüben, die diese beiden Felder voneinander abgrenzt. Auf die Problematik wurde in der einschlägigen Literatur mehrfach das Interesse gelenkt. LIEBMANN (56) berichtet bereits von Experimenten, bei welchen die Deutlichkeit einer Figur vor einem Hintergrund beurteilt wird. Wird die Helligkeit der Figur an die des Grundes angeglichen, so werden die Konturen der Figur undeutlich: "... es ist gar keine Figur auf dem Grund da, sondern alles ist ineinandergeflossen, es ist nur eine Art Grund da, in sehr merkwürdiger Weise fließend, auch flimmernd." Auf die Trennliniendeutlichkeit zwischen zwei Photometerhalbfeldern lenkten BOYNTON und KAISER (11) nähere Aufmerksamkeit. Auch sie verwendeten das maximale Verschwim-

men der Trennlinie - gleichbedeutend mit minimaler Trennliniendeutlichkeit (Minimally Distinct Border, MDB) - als Kriterium für Gleichhelligkeit. Die heterochromen Hellikeitsabgleiche nach dem MDB-Kriterium führen im allgemeinen zu Leuchtdichten, die dem Additivitätsgesetz nach ABNEY gehorchen. Werden die gleichen Messungen unter Verwendung des direkten Helligkeitsvergleichs (DV-Kriterium) beider Felder durchgeführt, so resultieren erhebliche Abweichungen vom Additivitätsgesetz. Beim Vergleich eines bunten mit einem weißen Feld nimmt die Trennlinie dann minimale Deutlichkeit an, wenn die Helligkeit des bunten Feldes etwas größer gewählt wird als die des weißen.

KAISER, HERZBERG und BOYNTON (48) konnten anhand von Messungen mit Hilfe achromatischer Vergleichskontraste feststellen, daß die Trennliniendeutlichkeit bei MDB-Bedingung mit der Sättigung des bunten Reizes korreliert. Zur quantitativen Erläuterung schlugen sie ein rechnerisches Modell vor, nach welchem sich chromatische und achromatische Kontraste wie orthogonale Vektoren addieren. Danach soll eine minimale Trennliniendeutlichkeit dann auftreten, wenn die achromatischen Unterschiede zwischen beiden Feldern gerade ausgeglichen sind. KAISER und GREENSPON (47) bestätigten diese Vorstellung anhand weiterer Kontrastuntersuchungen. Das Auftreten gewisser Verstärkungs- und Abschwächungsphänomene an der Trennlinie bei der Gegenüberstellung ausgewählter - z.B. komplementärer - Farbreize veranlaßte BOYNTON und GREENSPON (10) jedoch dazu, das Modell leicht zu modifizieren und zu erweitern. KAISER (46) und WAGNER und BOYNTON (85) verglichen Helligkeitsabgleiche nach dem MDB-Kriterium mit solchen nach der Flimmer-Methode. Die Hellempfindlichkeitsfunktion, welche nach dem MDB-Kriterium bestimmt wurde, zeigte gute Übereinstimmung mit der entsprechenden Funk-

tion nach dem Flimmer-Kriterium und mit der Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ des Farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931, modifiziert nach JUDD (43).

Das Ergebnis, daß es mit dem MDB-Kriterium gelingt, achromatische Unterschiede zwischen den Vergleichsfeldern zu eliminieren (vgl. auch (89)), veranlaßte BOYNTON und WAGNER (13) dazu, die Trennliniendeutlichkeit zwischen verschiedenfarbigen Reizen, welche nach dem MDB-Kriterium abgeglichen wurden, als Maß für rein chromatische Differenzen zu verwenden. Die Deutlichkeitsausprägungen, welche sich aus den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten der untersuchten Farbreize ergaben, ließen sich in Form von geometrischen Distanzen innerhalb einer Fläche darstellen. Dies schien darauf hinzuweisen, daß mit der Methode der minimalen Trennliniendeutlichkeit der grundsätzlich zweidimensionale Charakter chromatischer Größen erfaßt wird. Die Ergebnisse sprachen für einen Zusammenhang zwischen der Trennliniendeutlichkeit unter MDB-Bedingung und den chromatischen Empfindungsdifferenzen zwischen den miteinander verglichenen Reizen. BOYNTON (7) schloß daraus, daß die Beurteilung der Trennliniendeutlichkeit nicht nur als geeignetes Kriterium im Rahmen der heterochromen Photometrie eingesetzt werden könne, sondern zugleich die Möglichkeit der Messung von Sättigungsgrößen und Farbdifferenzen biete. WARD und BOYNTON (88) verwendeten die Methode zur Messung großer Farbabstände und erhielten damit Skalierungsdaten, welche mit denen von GUTH (33), der die unterschwellige Additionsmethode (subthreshold additivity method) anwandte, gut übereinstimmten. BUCK,FROME und BOYNTON (14) und FROME,BUCK und BOYNTON (28) konnten zeigen, daß die minimale Trennlinie während einer längeren Zeit intensiver Fixation zeitweise vollständig verschwindet. Die gesamte Zeit - dauer der Sichtbarkeit korreliert eng mit subjektiven

Schätzwerten der Deutlichkeit und kann damit auch als Maß für die Trennliniendeutlichkeit verwendet werden.

Überraschend war nun das Ergebnis von TANSLEY und BOYNTON (74), welche die Trennliniendeutlichkeit zwischen nicht-spektralen Farbreizen untersuchten. Es zeigte sich, daß zwischen Farbreizen, die auf tritanopischen Verwechslungslinien lagen, die Trennlinie beim MDB-Abgleich vollständig oder fast vollständig verschwand. Normalsichtige trichromatische Beobachter verhielten sich hinsichtlich der Beurteilung der Trennliniendeutlichkeit wie Tritanopen. Offenbar war bei fehlenden Luminanzdifferenzen die Deutlichkeitsempfindung der Trennlinie nur von der Erregung zweier Zapfenarten abhängig. Die maximal im kurzwelligen Bereich empfindlichen B-Zapfen schienen keinen Beitrag zur Trennliniendeutlichkeit zu liefern. Dies bestätigten auch TANSLEY und VALBERG (77) welche zusätzlich den kurzwelligen Bereich des Spektrums untersuchten. Da jedoch sowohl Buntsättigungs- als auch Bunttondifferenzen eine Beteiligung der B-Zapfen einschließen, kann - wie auch TANSLEY und BOYNTON (75) betonen - die Trennliniendeutlichkeit doch nicht zur Messung dieser beiden Größen herangezogen werden. In Anlehnung an diese Ergebnisse und an eigene weitere Untersuchungen schlugen VALBERG und TANSLEY (84) zur quantitativen Beschreibung der Trennlinieneigenschaften eine tritanopische Buntsättigungsfunktion (tritanopic purity-difference function) vor, welche ausschließlich die Beteiligung der Zapfenarten berücksichtigt, die ihr Empfindlichkeitsmaximum im mittel- und langwelligen Bereich besitzen.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Farbe, Farbreiz, Farbvalenz; Spektralwertfunktionen; Farbdreieck, Farbtafel

Wie bereits erwähnt (vgl. 1.), wird Farbe im Rahmen der Farbmetrik als diejenige Gesichtsempfindung definiert, durch die sich zwei aneinandergrenzende strukturlose Teile des Gesichtsfeldes bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge allein unterscheiden können (17). Eine Strahlung, die imstande ist, durch unmittelbare Reizung der Netzhaut Farbempfindungen hervorzurufen, heißt "Farbreiz". Das Auge reagiert sensibel auf elektromagnetische Strahlung im Bereich von etwa 380 nm bis 780 nm. Die spektrale Strahlungsverteilung eines Farbreizes wird durch seine Farbreizfunktion $\varphi(\lambda)$ beschrieben. Die Bewertung dieser Farbreizfunktion durch die Absorptionskurven dreier strahlungsempfindlicher Sehpigmente der Retina ist mit spezifischen Erregungen neuronaler Übertragungskanäle verbunden, welche zu einer Farbempfindung führen. Es gibt zwei Farbübertragungskanäle: einen, dessen Erregung mit dem Empfindungspaar Rot-Grün verbunden ist, und einen, dessen Erregung mit dem Empfingungspaar Blau-Gelb verbunden ist. Nicht jedem einzelnen Farbreiz entspricht eine eigene Farbempfindung; die Menge der Farbempfindungen ist vielmehr wesentlich kleiner als die der Farbreize. Mengentheoretisch handelt es sich um eine surjektive Abbildung (21) der Menge der Farbreize auf die Menge der Farbempfindungen. Nach dem Kriterium des gleichen Aussehens läßt sich die Menge der Farbreize in Klassen metamerer Reize (62) einteilen. Metamere Reize besitzen unterschiedliche Strahlungsverteilung, rufen jedoch identische Farbempfindugen hervor.

Jeder Farbreiz kann hinsichtlich seiner Wirkung auf das Auge durch additive Mischung dreier anderer untereinander

unabhängiger Farbreize ersetzt werden. "Unabhängig" bedeutet dabei, daß sich keiner der drei Farbreize durch additive Mischung der beiden anderen ersetzen läßt. Die vorliegenden Untersuchungen werden im WRIGHTschen (B,G,R)-System durchgeführt (91). Dieses verwendet als Primärvalenzen die monochromatischen Farbvalenzen $\vec{B}$ (460 nm), $\vec{G}$ (530 nm) und $\vec{R}$ (650 nm). Jeder Farbreiz kann durch drei entsprechende Farbwerte B, G und R charakterisiert werden, welche jeweils die Anteile der einzelnen Primärvalenzstrahlungen an der Gesamtmischung ausdrücken. Die Größe, welche durch dieses Farbwertetripel beschrieben wird und dementsprechend das Verhalten eines Farbreizes in der additiven Mischung mit anderen Farbreizen bestimmt, wird als "Farbvalenz" bezeichnet. Diese läßt sich als Ortsvektor $\vec{F} = B \cdot \vec{B} + G \cdot \vec{G} + R \cdot \vec{R}$ in einem dreidimensionalen vektoriellen Farbenraum darstellen, dessen Basisvektoren die zugrundeliegenden Primärvalenzen bilden. Farbmessung besteht in der Bestimmung der drei zu einer Farbvalenz gehörigen Fabwerte - jeweils bezogen auf das zugrundeliegende Primärvalenzsystem und strenggenommen nur gültig für einen Beobachter. Zwei Farbvalenzen mit identischen Farbwerten sind mit gleichen Farbempfindungen verknüpft; die zugehörigen Farbreize können metamer sein. Man kann die Klassen gleichaussehender oder metamerer Farbreize also als Farbvalenzen bezeichnen (62, 63).

Bestimmt man die Farbwerte der monochromatischen Farbreize eines isoenergetischen Spektrums, so erhält man die Spektralwertfunktionen. Bezogen auf das WRIGHTsche (B,G,R)-System lauten diese Funktionen $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$. Bezogen auf das Normvalenzsystem (X,Y,Z), auf welches sich die internationale Beleuchtungskommission CIE 1931 geeinigt hat (17), lauten sie $\bar{x}(\lambda)$,$\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$; letztere werden "Normspektralwerte" genannt. Wird jeder Wellenlänge aufgrund seiner Spektralwerte ein

Farbvalenzvektor im Farbenraum zugeordnet, so beschreiben die Spitzen dieser Vektoren die "Spektraltüte" (69). Bringt man im (B,G,R)-System diese Vektoren mit der Ebene $B + G + R = 1$ zum Schnitt, so erhält man eine zweidimensionale Darstellung des Spektralfarbenzugs. Abb. 1a zeigt diesen "Spektralfarbenzug" unter senkrechter Aufsicht auf die Fläche $B + G + R = 1$. Betrachtet man weiterhin den dreidimensionalen Farbenraum mit den Einheitsvektoren $\vec{B}$,$\vec{G}$ und $\vec{R}$, so läßt sich jeder Farbvalenz $\vec{F} = B\cdot\vec{B} + G\cdot\vec{G} + R\cdot\vec{R}$ ein Vektor $\vec{f} = b\cdot\vec{B} + g\cdot\vec{G} + r\cdot\vec{R}$ zuordnen, der den Ortsvektor des Schnittpunkts darstellt, welchen die Farbvalenz $\vec{F}$ oder deren Verlängerung mit der Ebene $B + G + R = 1$ bildet. Die Größen b,g und r dieses Ortsvektors $\vec{f}$ heißen "Farbwertanteile" der Farbvalenz $\vec{F}$. Ihr Zusammenhang mit den Farbwerten B, G und R lautet:

$$b = \frac{B}{B + G + R};$$

$$g = \frac{G}{B + G + R};$$

$$r = \frac{R}{B + G + R}.$$

Die Summe der Farbwertanteile ist 1.

Abb. 1a zeigt eine spezielle Form der "Farbtafel", in der das "Farbdreieck" mit den Eckpunkten $\vec{B}$,$\vec{G}$ und $\vec{R}$ eine gleichseitige Form annimmt. Es sind jedoch auch andere Formen nach den Gesetzen der projektiven Geometrie möglich, z.B. das rechtwinklige Farbdreieck der Abb. 1b. Ein Durchstoßpunkt F eines Ortsvektors $\vec{F}$ beschreibt mit projektiven Mitteln die Richtung von $\vec{F}$ im Farbenraum. Ein solcher Punkt wird als "Farbort" der zugehörigen Farbvalenz $\vec{F}$

Spektralfarbenzug, dargestellt in der
Ebene B+G+R = 1 unter senkrechter Aufsicht

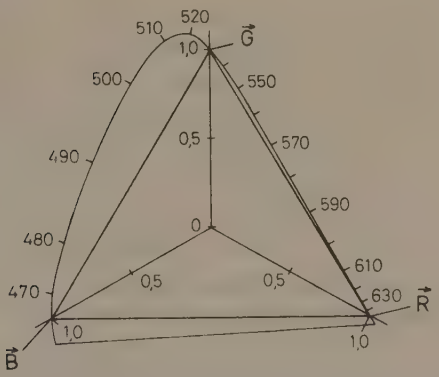


Abb. 1 a: Spektralfarbenzug im WRIGHTschen (B,G,R)-System unter senkrechter Aufsicht auf die Ebene B+G+R=1. Die Endpunkte der Primärvalenzvektoren beschreiben in dieser Ebene das Farbdreieck (vgl. Abb. 2). Die eingezeichneten Achsen stellen jedoch nicht die Koordinatenachsen des Farbdreiecks dar, sondern die Achsen des Farbenraumes, welche sich in der vorliegenden Abbildung verzerrt darstellen.

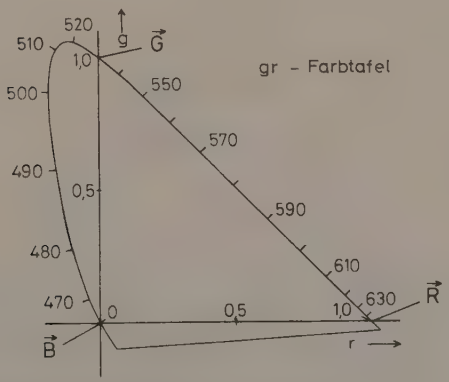


Abb. 1 b: gr-Farbtafel des WRIGHTschen (B,G,R)-Systems

bezeichnet. Jeder Farbvalenz $\vec{F}$ kann ein eigener Farbort zugeordnet werden.

Als Koordinatenachsen sind bei der Darstellung in Abb. 2b die Höhen des Farbdreiecks gewählt. Entsprechend stehen die eingezeichneten Koordinaten b, g und r auf den Dreieckseiten senkrecht. Diese Darstellungsweise habe ich von BOUMA (5, S.74) übernommen. Grundsätzlich können aber auch die Dreieckseiten als Koordinatenachsen gewählt werden (vgl. z.B. (53, S.79) und (60, S.59)). Wird die Höhe des Farbdreiecks als $h = 1$ definiert, dann sind die Koordinaten des Farborts, bezogen auf das Farbdreieck, identisch mit den Farbwertanteilen b, g und r. Dies soll anhand Abb. 2a verdeutlicht werden.

In dieser Abbildung können die Kanten a des dargestellten Würfels mit den Beträgen der Primärvalenzen $\vec{B}$,$\vec{G}$ und $\vec{R}$ identifiziert werden. Die Höhe h des eingezeichneten gleichseitigen Dreiecks $\vec{B} - \vec{G} - \vec{R}$ stellt die Höhe des Farbdreiecks dar. Zwischen h und a besteht folgende Beziehung:

$$(1)\quad h^2 = a^2 + \left(\frac{c}{2}\right)^2;$$

$$(2)\quad c^2 = a^2 + a^2;\ \Rightarrow\ c = a\cdot\sqrt{2};\rightarrow(1)$$

$$\Rightarrow (1)'\quad h^2 = a^2 + a^2\cdot\frac{1}{2};$$

$$h = a\cdot\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\ ;\ \text{oder}\quad \frac{h}{a} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = k_o;$$

Diese Beziehung stellt rein geometrisch betrachtet das Verhältnis der Farbdreieckshöhen zu den Einheitsvektoren im dreidimensionalen Farbenraum dar. Man erhält dann die Koordinaten b', g' und r' des Farbdreiecks (welche sich auf die nicht normierten Einheitslängen im Farbdreieck beziehen, und für welche in Abb. 2a beispielhaft die

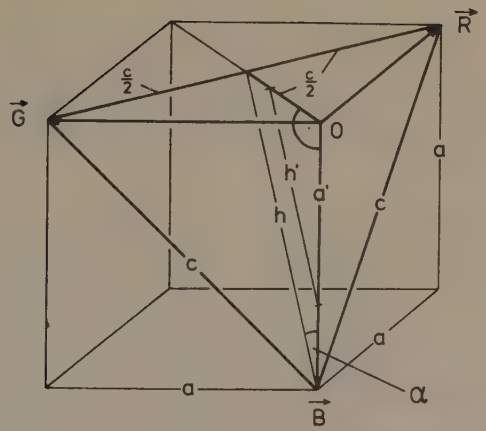


Abb. 2a: Würfel-Modell zur Darstellung der räumlichen Beziehung zwischen den Primärvalenzen des (B,G,R)-Farbenraumes und der Ebene B+G+R=1. Die Kanten a des Würfels lassen sich mit den Koordinatenachsen $\vec{B}$,$\vec{G}$ und $\vec{R}$ des Farbenraumes identifizieren, die Diagonalen c der Würfelflächen mit den Seiten des Farbdreiecks $\vec{B}$-$\vec{G}$-$\vec{R}$. Als Koordinatenachsen des Farbdreiecks wurden die Dreieckshöhen h gewählt (vgl.(5)). Die Farbwertanteile (hier in Form von h' repräsentiert) ergeben sich aus den Farbwerten (hier in Form von a' repräsentiert) durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor. α stellt den Winkel dar, den die Primärvalenzen mit der Farbtafelebene bilden.

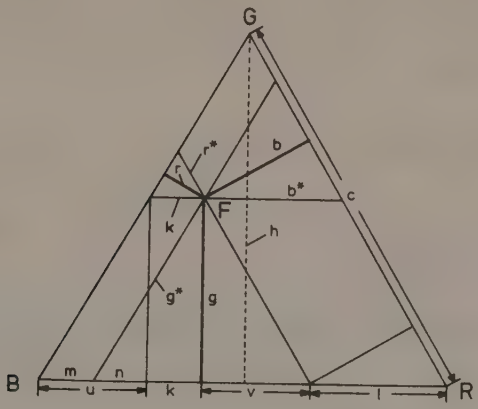


Abb. 2b: Farbdreieck B-G-R mit Farbdreieckskoordinaten (identisch mit Farbwertanteilen). Werden als Koordinatenachsen die Höhen h des Farbdreiecks verwendet (vgl.(5)), so stellen b, g und r die Koordinaten eines Farbortes dar; verwendet man als Koordinatenachsen die Seiten c des Farbdreiecks (vgl.(53) od. (60)), so stellen b^*, g^* und r^* die Farbortkoordinaten dar. Es gilt $b+g+r=h$ und $b^*+g^*+r^*=c$.

Strecke h' eingezeichnet ist) durch Multiplikation der Farbwertanteile b, g und r (für welche in Abb. 2a beispielhaft a' eingezeichnet ist) mit der Konstanten $k_o = \sqrt{\frac{3}{2}}$. Es gilt

$$b' = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot b;$$

$$g' = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot g;$$

$$r' = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot r;$$

und entsprechend

$$b' + g' + r' = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot (b + g + r) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot 1.$$

Hinsichtlich des Winkels α, welchen die Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$ und $\vec{R}$ mit der Ebene B + G + R = 1 einschließen, gilt die Beziehung:

$$\cos \alpha = \frac{a}{h};$$

$$\alpha = \text{arc cos } \frac{a}{h} = \arccos \sqrt{\frac{2}{3}};$$

$$\boxed{\alpha = 35{,}26^0;}$$

Die Koordinaten b', g' und r' lassen sich also auch darstellen als

$$b' = b \cdot \frac{1}{\cos \alpha};$$

$$g' = g \cdot \frac{1}{\cos \alpha};$$

$$r' = r \cdot \frac{1}{\cos \alpha};$$

und entsprechend lautet die Summe

$$b' + g' + r' = \frac{1}{\cos\alpha} \cdot (b + g + r) = \frac{1}{\cos\alpha} \cdot 1.$$

Es wird also deutlich, daß sich die Koordinaten des Farbdreiecks von den Farbwertanteilen geometrisch lediglich dadurch unterscheiden, daß sie durch die Multiplikation mit einem konstanten Faktor einer gewissen Verlängerung unterworfen sind. Diese Verlängerung kann dadurch aufgehoben werden, daß der Einheitsvektor im Koordinatensystem des Farbdreiecks mit dem Faktor

$$\frac{1}{k_o} = \sqrt{\frac{2}{3}} = \cos\alpha$$

multipliziert wird, was gleichbedeutend ist mit einer Normierung dieses Einheitsvektors auf die Länge des Einheitsvektors im dreidimensionalen Farbenraum, also auf die Länge 1. Die Koordinaten im Farbdreieck sind dann numerisch identisch mit den Farbwertanteilen b, g und r. (Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Farbenraum und Farbdreieck vgl. auch (5 , S. 73 ff.)).

Die Summe der Farbwertanteile im Farbdreieck ist gleich der Länge der Höhe h in diesem Dreieck. Es gilt daher

$$b + g + r = h = 1.$$

Dies soll anhand von Abb. 2 b erläutert werden. Wie aus dieser Abbildung deutlich wird, gelten im Farbdreieck folgende Zusammenhänge:

(3) $\frac{b}{l} = \sin 60^{\circ}$;

(4) $\frac{g}{v} = \tan 60^{\circ}$;

(5) $\frac{r}{k} = \sin 60^{\circ}$;

(6) $\frac{g}{u} = \tan 60^{\circ}$;

(7) $k = c - u - v - l$;

(8) $h = c \cdot \sin 60^{\circ}$;

aus (4) und (6) folgt: $v = u = g \cdot \frac{1}{\tan 60^{\circ}} = g \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$; →(7)

aus (3) folgt $l = \frac{b}{\sin 60^{\circ}} = b \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$; →(7)

aus (5) folgt $k = \frac{r}{\sin 60^{\circ}} = r \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$; →(7)

damit erhält man

(7)' $r \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = c - 2 \cdot g \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} - b \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$;

$c = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (b + g + r)$; → (8)

und somit

(8)' $h = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (b + g + r) \cdot \sin 60^{\circ}$;

$h = b + g + r$; q.e.d.

Geht man dagegen von einer Darstellungsform aus, bei der als Koordinatenachsen des Farbdreiecks die Dreieckseiten verwendet werden, so gelten als Farbortkoordinaten die

Strecken b^+, g^+ und r^+ (Abb. 2 b). Hierbei gelten die Beziehungen

$$b^+ = l;$$

$$g^+ = v + k + u;$$

$$r^+ = m;$$

und damit

$$b^+ + g^+ + r^+ = l + v + k + u + m = c.$$

Wird die Länge einer Dreieckseite als c = 1 definiert, so zeigt sich wiederum, daß die Summe der Farbortkoordinaten den Wert 1 ergibt.

Da nur jeweils zwei der drei Farbwertanteile voneinander unabhängig sind, der dritte sich also immer aus den beiden übrigen berechnen läßt, kann der Spektralfarbenzug ohne Informationsverlust auch in einem Koordinatensystem mit nur zwei Koordinatenachsen dargestellt werden. Wählt man r als Abszisse und g als senkrechte Koordinate, so erhält man als Darstellung die Farbtafel, wie sie Abb. 1b zeigt. Diese wird gr-Farbtafel genannt. Die Lage des Farbortes einer Farbe in diesem System beschreibt deren Farbart. Die gr-Farbtafel wird zur Darstellung der Versuchsergebnisse benutzt.

2.2. Helligkeit, Leuchtdichte; ABNEYsches Gesetz, Leuchtdichtebeiwerte, Alychne; Helligkeitskriterien

Die Stärke einer Lichtempfindung, wie sie mit jeder Farbempfindung unlösbar verbunden ist, wird allgemein Helligkeit genannt. Als Helligkeitsmaß dient bei Selbstleuchtern und in allen Fällen, wo die Farbe in lichtloser Umgebung beurteilt wird die Leuchtdichte L (17). Ihre Gleichung lautet

$$L = k_L \cdot \int_m^n V(\lambda) \cdot \varphi(\lambda) \cdot d\lambda \ ;$$

mit m = 380 nm und n = 780 nm (16).

$V(\lambda)$ bedeutet dabei die photopische spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion, wie sie 1931 von der internationalen Beleuchtungskommission CIE festgelegt (16) und 1951 vom JUDD (43) modifiziert wurde; $\varphi(\lambda)$ ist die Farbreizfunktion des jeweiligen Farbreizes. Für Selbstleuchter ist diese Funktion mit der Strahlungsfunktion $S(\lambda)$ identisch. Definitionsgemäß besteht zwischen der Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ und den trichromatischen Spektralwertfunktionen eine lineare Beziehung, die durch das ABNEYsche Gesetz (1) ausgedrückt wird. Auf das (B,G,R)-System bezogen lautet dieses Gesetz

$$(9) \quad L = \beta \cdot B + \gamma \cdot G + \varrho \cdot R \ .$$

β, γ und ϱ sind die Leuchtdichtebeiwerte der Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$ und $\vec{R}$. Sie stellen die relative Helligkeit dar, die die einzelnen Primärvalenzen - wenn man sie untereinander vergleicht - vermitteln können. Der Helligkeitsbeitrag, den eine Primärvalenz zur Gesamthelligkeit einer gemessenen Farbvalenz $\vec{F} = B \cdot \vec{B} + G \cdot \vec{G} + R \cdot \vec{R}$ liefert, ist also proportional zum zugehörigen Leuchtdichtebeiwert und zum jeweiligen Farbwert (vgl. Gl. 9). Wie SCHEIBNER (62) ausführlich darlegt, kann das System der Photometrie als Homomorphismus des farbvalenzmetrischen Systems aufgefaßt

werden. Nach der Äquivalenzrelation der Gleichhelligkeit kann der dreidimensionale Farbenraum auf das eindimensionale photometrische Maßsystem abgebildet werden. Mengentheoretisch entspricht dies einer "Vergröberung" der trichromatischen Partition, welche der Normalsichtige an der Menge physikalisch verschiedener Reize vornimmt. Der Homomorphismus wird durch den "Kern" der Abbildung bestimmt. Dieser besteht aus allen Vektoren, die in den Ebenen gleicher Helligkeit liegen. SCHRÖDINGER (69) bezeichnete die Ebene im Farbenraum, in welcher alle leuchtdichtefreien Vektoren enden, als "Alychne" und alle hierzu parallelen Ebenen als "Isolychnen" (vgl. auch 4.4.2.). Als Kern des Homomorphismus ist also die Alychne und alle Vektoren, die in Isolychnen liegen, aufzufassen.

Die Festlegung der Gleichhelligkeit von verschiedenfarbigen Reizen berührt ein grundsätzliches Problem der heterochromen Photometrie: Es wird vom Beobachter gefordert, zwei qualitativ unterschiedliche Sinneseindrücke hinsichtlich eines bestimmten Aspektes - den der Helligkeit - als gleich zu identifizieren. Entscheidend ist daher im Rahmen der Photometrie die klare Festlegung von allgemeingültigen Kriterien der Gleichhelligkeit, durch welche die Empfindungsgröße "Helligkeit" erst definierbar und meßbar wird. KÖNIG (53) befaßt sich ausführlich mit dieser Problematik in einer umfangreichen Studie über den Begriff der Helligkeit, seine Wandlungen und seine Formen.

Helligkeitsabgleiche können nach zwei Verfahren, dem Direkt-Vergleich und dem Filterverfahren, durchgeführt werden. Dabei können wiederum jeweils verschiedene Vergleichsprinzipien, nämlich das Gleichheits-, das Kontrast- und das Flimmerprinzip angewendet werden (vgl. z.B. (58) und (38)). Beim Direkt-Vergleich werden beide abzugleichenden Farbreize dem Auge in ihrer ursprünglichen Strahlungsverteilung angeboten

und hinsichtlich eines der Vergleichsprinzipien beurteilt. Es handelt sich also hierbei - bis auf den Fall, daß beide Farbreize metamer sind - immer um heterochrome Helligkeitsabgleiche. Beim Filterverfahren werden dagegen durch die Anwendung von Farbfiltern bestehende Farbunterschiede weitgehend eliminiert, so daß möglichst nur isochrome Abgleiche durchzuführen sind. Die Leuchtdichte des Vergleichsreizes läßt sich dann aus den Abgleichdaten unter Berücksichtigung des spektralen Transmissionsgrades $\tau(\lambda)$ des verwendeten Filters berechnen.

Beim Gleichheitsprinzip werden zwei Photometerhalbfelder vom Beobachter hinsichtlich ihres direkten Helligkeitseindrucks miteinander verglichen. Ein Halbfeld wird dabei so weit abgeschwächt, bis es die gleiche Hellempfindung hervorruft wie das andere. Beim Kontrastprinzip werden die beiden Felder dagegen so angeglichen, daß sich zwei gleichgeformte trapezförmige Kontrastflächen, die in beiden Halbfeldern vorgegeben sind, gegenüber dem Umfeld des jeweiligen Photometerhalbfelds gleich stark abheben. Das Flimmerprinzip beruht darauf, daß das Licht der zu vergleichenden Reize dem Beobachter in zeitlichem Wechsel dargeboten wird. Da das Auge auf Farbunterschiede träger reagiert als auf Leuchtdichteunterschiede, werden von einer bestimmten "kritischen Flimmerfrequenz" an keine Farbunterschiede mehr wahrgenommen, während Leuchtdichteunterschiede weiterhin einen Flimmereindruck hervorrufen. Durch Helligkeitsanpassung beider Farbreize läßt sich dieser Flimmereindruck auf ein Minimum reduzieren. Bei dieser Einstellung besitzen beide Reize identische Leuchtdichten.

In den vorliegenden Untersuchungen wurden die Helligkeitsabgleiche ausschließlich nach dem Direkt-Vergleich-Verfahren durchgeführt. Das heißt, die zu vergleichenden Farbreize werden in ihrer ursprünglichen spektralen Beschaffenheit dem Beobachter dargeboten, also nicht durch Filter verändert. Als Abgleichsprinzipien wurden das Gleichheitsprinzip

zum einen und die Beurteilung der Trennliniendeutlichkeit zum anderen angewandt. Da beim Gleichheitsprinzip direkte Helligkeitseindrücke miteinander verglichen werden, soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit hierfür die kurze Bezeichnung Direktvergleich (DV)-Kriterium gewählt werden. Die Bezeichnung MDB-Kriterium (Minimally Distinct Border, vgl. 1) wird sich hingegen auf solche Abgleiche beziehen, welche ausschließlich unter Berücksichtigung der Trennliniendeutlichkeit durchgeführt werden. Beide Kriterien werden jedoch - um es nocheinmal zu betonen - unter Verwendung des Direkt-Vergleich-Verfahrens angewandt. Für die Kurzbezeichnung "DV-Kriterium" müßte also genaugenommen der Ausdruck "Direkt-Vergleich-Verfahren unter Verwendung des Gleichheitsprinzips" gesetzt werden, für die Kurzbezeichnung "MDB-Kriterium" der Ausdruck "Direkt-Vergleich-Verfahren unter Verwendung der Einstellung auf minimale Trennliniendeutlichkeit".

3. Aufgabenstellung:

In der vorliegenden Arbeit soll das MDB-Kriterium und das Direktvergleich(DV)-Kriterium zur Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte nach zwei verschiedenen Methoden angewandt werden (vgl. 4.4.). Die erste Methode soll auf dem Abgleich der drei instrumentellen Primärvalenzen eines Dreifarbenmeßgerätes mit einem vorgegebenen Testreiz beruhen (vgl. 4.4.1.), die zweite Methode soll sich auf die experimentelle Bestimmung leuchtdichtefreier Quervektoren im Farbenraum stützen (vgl.4.4.2.). Von Interesse soll sein, inwiefern sich die Ergebnisse bei Anwendung des MDB-Kriteriums von den Ergebnissen bei Anwendung des DV-Kriteriums unterscheiden. Insbesondere soll untersucht werden, ob die Lage der Vergleichsreize im Farbenraum auf die Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte einen Einfluß ausübt.

Ferner sollen für die Versuchsperson die individuellen Spektralwertfunktionen (vgl. 4.6.) und die Hellempfindlichkeitsfunktion - unter Verwendung des MDB-Kriteriums - (vgl. 4.7.) bestimmt werden.

Die ermittelten Leuchtdichtebeiwerte sollen nach dem ABNEYschen Gesetz auf die Spektralwertfunktionen der Versuchsperson angewandt werden, und die resultierenden Hellempfindlichkeitsfunktionen sollen mit der nach dem MDB-Kriterium direkt bestimmten Hellempfindlichkeitsfunktion der Versuchsperson verglichen werden. Außerdem sollen die ermittelten Daten mit denen des CIE-Normalbeobachters verglichen werden. Es sollen Aussagen getroffen werden über die Tauglichkeit beider Kriterien für die experimentelle Festlegung additiver Leuchtdichtewerte.

Weiterhin interessiert, welchen Einfluß rein chromatische Empfindungsunterschiede - bedingt durch heterochrome Vergleichsfelder, welche nach dem MDB-Kriterium abgeglichen werden - auf die Deutlichkeitsausprägung der wahrnehmbaren Trennlinie ausüben. Das Verhalten der Trennlinie bei Veränderung der Blau-Gelb- und der Rot-Grün-Erregung soll beschrieben werden (vgl. 4.5.).

Schließlich soll die spektrale Distinktibilität als Schätzfunktion experimentell ermittelt und mit der tritanopischen Buntsättigunsfunktion verglichen werden, welche ihrerseits unter Verwendung von Orginalmeßdaten der Versuchsperson festgelegt werden soll (vgl. 4.8.).

4. Methodik und Versuchsdurchführung

4.1. Versuchsperson

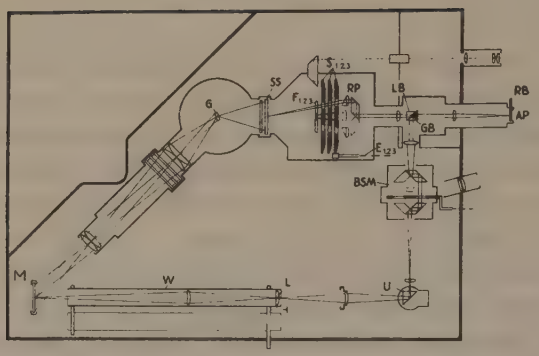
Alle experimentellen Messungen wurden an einer männlichen normalsichtigen trichromatischen Versuchsperson (25 J.) durchgeführt, dem Verfasser. Die Untersuchung am NAGELschen Anomaloskop ergab die Beurteilung "scharf einstellender normalsichtiger Trichromat mit geringer bis fehlender Umstimmbarkeit" (24). Beim FARNSWORTH-Dichotomous-Test (D 15) (25 u.37) wurden im Test und Retest 0 Fehler gemacht. Beim FARNSWORTH-MUNSELL-100 Hue-Test (F 100) (26 u.37) ergab sich eine Gesamtfehlerquote von 12 im Test, eine solche von 8 im Retest (37). Gutes Farbunterscheidungsvermögen ist damit ausreichend gewährleistet. Die Untersuchung der Sehschärfe ergab für das rechte Auge einen Visus von 1,25; für das linke Auge ergab sich ein Visus von 1,0. Für alle experimentellen Messungen wurde stets das rechte Auge herangezogen.

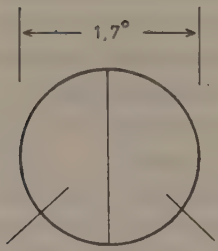
4.2 Apparatur

Die Untersuchungen wurden an einem von BECK und RICHTER modifizierten Dreifarbenmeßgerät (DFM) nach GUILD-BECHSTEIN durchgeführt (Abb. 3). Eine ausführliche Darstellung der verschiedenen Entwicklungsstufen und der vorliegenden Neukonstruktion findet sich bei BECK und RICHTER (3).

Dem Aufbau des Gerätes liegt ein Meßverfahren zugrunde, das sich auf das Prinzip der additiven Farbmischung stützt. Dabei wird der zu bestimmende Farbreiz über einen Probenstrahlengang im linken Halbfeld eines Photometerfeldes vorgegeben und mit einer variierbaren Mischung aus drei monochromatischen Strahlungen verglichen, welche im rechten Halbfeld erscheint (Abb. 3). Zur Realisierung der Primärvalenzstrahlungen finden Interferenzfilter ($F_{1,2,3}$ in Abb. 3) der Wellenlängen von angenähert 460 nm, 530 nm und 650 nm Verwendung. Die Mischung vollzieht sich durch Rotation eines Prismenpaares (RP) vor sechs Öffnungen im Strahlengang, die je paarweise - diametral gegenüberliegend - mit gleichen Filtern bestückt sind. Über drei Triebknöpfe ($E_{1,2,3}$) können mit Hilfe von Abdecksektoren die Öffnungen in der Größe verändert werden, wodurch sich der Anteil der einzelnen Primärvalenzen an der Mischung ändert. Diese Einstellungen können auf eingebauten Dezimalskalen als Farbwerte D, E und F abgelesen werden; sie beziehen sich auf die instrumentellen Primärvalenzen $\vec{D}$ (460 nm), $\vec{E}$ (530 nm) und $\vec{F}$ (650 nm).

Zur Helligkeitsänderung des zu messenden Farbreizes im linken Photometerhalbfeld ist in den Probenstrahlengang eine BRODHUN-Sektorenmeßvorrichtung (BSM) eingebaut. Auch hier vollzieht sich die Abschwächung des Strahlengangs an abdeckbaren Öffnungen,über die ein Prismenpaar rotiert. Dadurch wird eine nichtselektive Schwächung erzielt. Der prozentuale Anteil der Strahlung, der die Vorrichtung





Farbreiz des Probenstrahlengangs

Farbreiz des Mischstrahlengangs

$\vec{F} = B \cdot \vec{B} + G \cdot \vec{G} + R \cdot \vec{R}$

Abb. 3: Dreifarben-Meßgerät nach Guild-Bechstein: Ap: Austrittspupille; BSM: BRODHUN-Sektorenmeßvorrichtung; $E_{1,2,3}$: Triebknöpfe; $F_{1,2,3}$: Farbfilter; G: Glühlampe; GB: Gesichtsfeldblende; GK: Graukeil; L: Linse; LB: LUMMER-BRODHUN-Würfel; M: MgO_2-Schirm; RB: Revolverblende; RP: rotierendes Prismenpaar; $S_{1,2,3}$: Sektorenpaare; SS: Streuscheibe; U: Umlenkprisma; W: Wechseloptik. Unten: zweigeteiltes Photometerhalbfeld.
Für DV-Abgleiche wurde über die Gesichtsfeldblende ein 50 µm dicker Draht gespannt, der die Trennlinie des Gesichtsfeldes verdeckte.

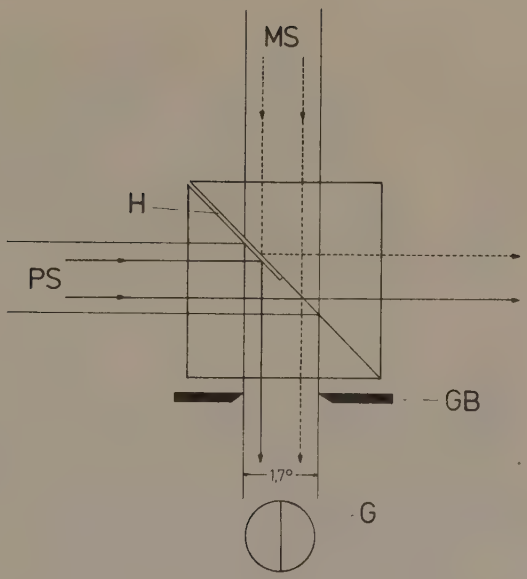


Abb. 4: Mischprisma (LUMMER-BRODHUN-Würfel), das den Probenstrahlengang (PS) in die linke Hälfte des Gesichtsfeldes und den Mischstrahlengang (MS) in die rechte Hälfte des Gesichtsfeldes lenkt.
H : ausgeschliffener luftgefüllter Hohlraum;
GB: Gesichtsfeldblende; G: Gesichtsfeld.

ungehindert durchsetzt, wird an einer weiteren Skala als Helligkeitswert H abgelesen.

Die Lichtquelle wurde sowohl für den Probenstrahlengang als auch für den Mischstrahlengang von einer 500 W - Halogenglühlampe gebildet. Diese war auf eine ähnlichste Farbtemperatur (17) von $T_n = 3000^oK$ eingestellt. Die Leuchtdichte der Primärvalenzen lag damit - bei einer Farbwerteinstellung von jeweils 100 Skt - in der Größenordnung von $L_D = 1\ cd/m^2$, $L_E = 42\ cd/m^2$ und $L_F = 25\ cd/m^2$.

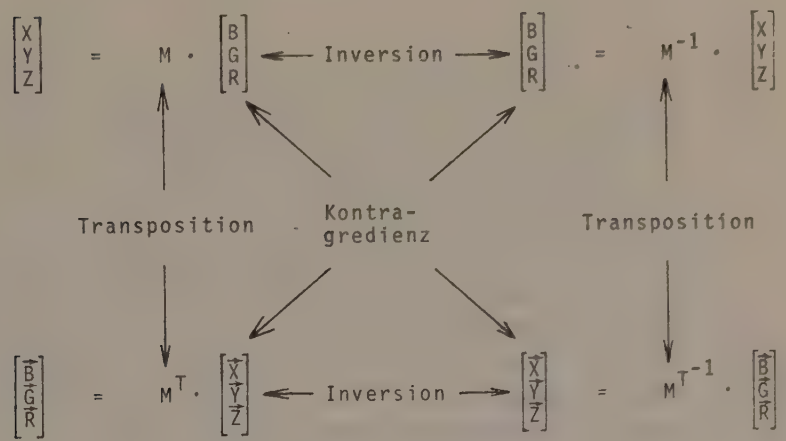
Die Vereinigung beider Strahlengänge erfolgt mit Hilfe eines LUMMER-BRODHUN-Würfels (LB in Abb. 3, detailliert dargestellt in Abb. 4). Dabei handelt es sich um einen aus zwei Dreiecksprismen zusammengesetzten Würfel, bei dem die Kontaktfläche zwischen beiden Prismen zur einen Hälfte mit optisch indifferentem Kitt bedeckt ist, zur anderen Hälfte dagegen so ausgeschliffen ist, daß die beiden Prismenflächen hier durch einen luftgefüllten Hohlraum (H in Abb. 4) getrennt werden. Die an den Hohlraum grenzenden Flächen lenken die Strahlung um 90^o ab, die mit Kitt bedeckten Flächen lassen die Strahlung ungehindert passieren. Die Trennlinie zwischen beiden Photometerhalbfeldern wird also durch den Rand des ausgeschliffenen Hohlraums gebildet.

Zur Anwendung des Direktvergleich -(DV)-Kriteriums wurde über die Gesichtsfeldblende (GB) ein 50 μm dicker Draht gespannt, der exakt die Trennlinie verdeckte. Der Draht erschien der Versuchsperson unter einem Sehwinkel von 1,56'.

4.3. Wechsel des Bezugsystems

4.3.1. Transformationseigenschaften

In der vorliegenden Arbeit werden drei verschiedene Bezugsysteme verwendet: das instrumentelle (D,E,F)-Primärvalenzsystem, das WRIGHTsche (B,G,R)-Bezugsystem (91) und das (X,Y,Z)-Normvalenzsystem CIE 1931. Der Obergang von einem Bezugsystem in ein anderes erfolgt nach den Regeln der Matrizenrechnung (4 u. 55). Dies sei anhand des Obergangs vom WRIGHTschen (B,G,R)-System in das (X,Y,Z)-Normvalenzsystem näher dargestellt:



Hierbei wird die zu M inverse Matrix mit "M^{-1}" bezeichnet; Transposition von M ergibt die Matrix "M^T". Die zu M kontragrediente Matrix $(M^T)^{-1}$ erhält man durch Inversion und Transposition der Matrix M.

Die Leuchtdichtebeiwerte werden wie die Primärvalenzen transformiert (66).

4.3.2. Transformationen aus dem instrumentellen Primärvalenzsystem in das WRIGHTsche (B,G,R)-System (Kalibrierung des Dreifarben-Meßgerätes, DFM)

Die Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$ und $\vec{R}$ des WRIGHTschen Bezugsystems sind so gewählt, daß sich die Farbwerte B_{494} und G_{494} für die Messung des monochromatischen Farbreizes λ_1 = 494 nm und die Farbwerte R_{583} und G_{583} für die Messung des monochromatischen Farbreizes λ_2 = 583 nm wie 1:1 verhalten. Es gilt also

$$(10) \qquad \frac{B_{494}}{G_{494}} = \frac{R_{583}}{G_{583}} = 1.$$

Diese Bedingung erfüllen die instrumentellen Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$ und $\vec{F}$ des DFM-Gerätes nicht. Sie besitzen zwar die gleiche Richtung im Farbenraum wie die Primärvalenzen des WRIGHTschen Systems, sie unterscheiden sich jedoch von diesen durch ihre Länge. Jede Farbvalenz $\vec{C} = D\cdot\vec{D} + E\cdot\vec{E} + F\cdot\vec{F}$, die mit dem DFM-Gerät gemessen wurde, muß deshalb mit einer Diagonalmatrix M_D multipliziert werden, um im WRIGHTschen System in der Form $\vec{C} = B\cdot\vec{B} + G\cdot\vec{G} + R\cdot\vec{R}$ dargestellt werden zu können, also

$$(11) \qquad \vec{C} = M_D \cdot \begin{bmatrix} D \\ E \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ G \\ R \end{bmatrix}; \qquad \text{mit}$$

$$(11a) \qquad M_D = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 \end{bmatrix}.$$

Wird Gleichung (11) in drei lineare Gleichungen ausgeschrieben, so erhält man die Transformationsgleichungen für die Farbwerte aus dem (D,E,F)- in das (B,G,R)-System:

$$B = k_1 \cdot D;$$

(11b) $$G = 1 \cdot E;$$

$$R = k_2 \cdot F.$$

Die Transformation der Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$ und $\vec{F}$ in das WRIGHTsche (B,G,R)-System erfordert die zu M_D kontragrediente Matrix $(M_D^T)^{-1} = \bar{M}_D$. Mit Hilfe dieser Matrix $\bar{M}_D$ lauten die Transformationsgleichungen für die Primärvalenzen:

$$\vec{B} = \frac{1}{k} \cdot \vec{D};$$

(12) $$\vec{G} = 1 \cdot \vec{E};$$

$$\vec{R} = \frac{1}{k_2} \cdot \vec{F}.$$

Zur Bestimmung der Umrechnungsfaktoren k_1 und k_2 werden die Farbwerte der monochromatischen Reize $\lambda_1 = 494$ nm und $\lambda_2 = 583$ nm mit dem DFM-Gerät gemessen. Aus Gleichung (10) und Gleichungssystem (11b) ergibt sich dann

$$\frac{D_{494} \cdot k_1}{E_{494}} = \frac{B_{494}}{G_{494}} = 1;$$

und

$$\frac{F_{583} \cdot k_2}{E_{583}} = \frac{R_{583}}{G_{583}} = 1;$$

woraus sich k_1 und k_2 bestimmen lassen zu

(13) $$k_1 = \frac{E_{494}}{D_{494}}$$

$$k_2 = \frac{E_{583}}{F_{583}}$$

Die Diagonalmatrix M_D lautet demnach

$$M_D = \begin{bmatrix} \frac{E_{494}}{F_{494}} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E_{583}}{F_{583}} \end{bmatrix} .$$

Für jeder Versuchssitzung wurden die Umrechnungsfaktoren k_1 und k_2 neu bestimmt. Mit ihrer Hilfe wurden die experimentellen Meßergebnisse in das (B,G,R)-System umgerechnet, so daß Änderungen der Strahlungsverteilung - bedingt durch Änderung der Glühlampenschwärzung oder durch Lampenwechsel o.ä. - keinen Einfluß auf die Meßergebnisse haben konnten.

Sollen die Leuchtdichtebeiwerte δ, ε und φ des (D,E,F)-Systems in das (B,G,R)-System transformiert werden, so muß die zu M_D kontragrediente Matrix $\overline{M}_D$ herangezogen werden [66]. Die Transformationsgleichungen für die Leuchtdichtebeiwerte lauten also

$$\beta = \frac{1}{k_1} \cdot \delta ;$$

$$\gamma = 1 \cdot \varepsilon ; \qquad (13a)$$

$$\vartheta = \frac{1}{k_2} \cdot \varphi ;$$

[66] [illegible]

4.3.3. Tansformationen aus dem WRIGHTschen (B,G,R)-System in das (X,Y,Z)-Normvalenzsystem CIE 1931

Die (X,Y,Z)-Farbwerte der Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$ und $\vec{R}$ bezogen auf das Normvalenzsystem CIE 1931 lassen sich aus Tabellen (17) in Form von Normspektralwerten für die monochromatischen Farbreize λ_1 = 460 nm, λ_2 = 530 nm und λ_3 = 650 nm entnehmen. Da sich die Normspektralwerte auf ein energiegleiches Spektrum beziehen, die gegenseitige Normierung der Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$ und $\vec{R}$ jedoch vorläufig unbestimmt ist, lassen sich die Transformationsgleichungen zwischen den Primärvalenzen beider Systeme zunächst nur bis auf drei noch zu bestimmende Proportionalitätsfaktoren k, l und m aufstellen:

$$
\begin{aligned}
\vec{B} &= k \cdot (0{,}2908 \cdot \vec{X} + 0{,}06 \cdot \vec{Y} + 1{,}6692 \cdot \vec{Z});\\
\vec{G} &= l \cdot (0{,}177257 \cdot \vec{X} + 0{,}8738108 \cdot \vec{Y} + 0{,}03950728 \cdot \vec{Z});\\
\vec{R} &= m \cdot (0{,}2835 \cdot \vec{X} + 0{,}107 \cdot \vec{Y});
\end{aligned}
\qquad (14)
$$

Durch Transponieren der Matrix des Gleichungssystems (14) erhält man die Bestimmungsgleichungen für die gesuchten Normfarbwerte X, Y und Z:

$$
\begin{aligned}
X &= k \cdot 0{,}2908 \cdot B + l \cdot 0{,}177257 \cdot G + m \cdot 0{,}2835 \cdot R;\\
Y &= k \cdot 0{,}06 \cdot B + l \cdot 0{,}8738108 \cdot G + m \cdot 0{,}107 \cdot R;\\
Z &= k \cdot 1{,}6692 \cdot B + l \cdot 0{,}03950728 \cdot G.
\end{aligned}
\qquad (15)
$$

Zur Bestimmung der Proportionalitätsfaktoren k, l und m wurden die Farbwerte eines Farbfilters (VG 12, 2mm) am DFM-Gerät von der VP gemessen und in (B,G,R)-Werte umgerechnet (vgl. 4.3.1.). Dies ergab die Farbwerte B = 21,3751; G = 55,5400; R = 12,7395. Die Leuchtdichte des abgeglichenen Photometerfeldes betrug L = 28,7122 cd/m^2. Zusätzlich waren die Normspektralwerte des Filters aus früheren Messungen (66) bekannt nämlich X = 13,358; Y = A = 22,836;

Z = 16,052; (A stellt den Hellbezugswert (17) dar). Da im Normvalenzsystem CIE 1931 der Farbwert Y die Leuchtdichte der gemessenen Farbvalenz wiedergibt, wurden die Normspektralwerte des Filters VG 12, 2mm auf die Bedingung Y = L umgerechnet. Damit ergab sich X = 16,7953; Y = L = 28,7122; Z = 20,1825. Das Einsetzen der (X,Y,Z)-Farbwerte von VG 12 in die linke Seite des Gleichungssystems (15) und der zugehörigen (B,G,R)-Farbwerte in die rechte Seite ermöglichte die Bestimmung der Proportionalitätsfaktoren k, l und m. Ihre Berechnung führte zu folgenden Transformationsgleichungen

$$
\begin{aligned}
&X = 0{,}1235553 \cdot B + 0{,}0721691 \cdot G + 0{,}526641 \cdot R; \\
(16)\quad &Y = 0{,}0254928 \cdot B + 0{,}355767 \cdot G + 0{,}1987675 \cdot R; \\
&Z = 0{,}7092108 \cdot B + 0{,}0160851 \cdot G;
\end{aligned}
$$

Eine Farbvalenz $\vec{C} = B \cdot \vec{B} + G \cdot \vec{G} + R \cdot \vec{R}$ muß mit der Matrix M dieses Gleichungssystems multipliziert werden, um im Normvalenzsystem CIE 1931 in der Form $\vec{C} = X \cdot \vec{X} + Y \cdot \vec{Y} + Z \cdot \vec{Z}$ dargestellt werden zu können. Es gilt also

$$
\vec{C} = M \cdot \begin{bmatrix} B \\ G \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}.
$$

Die Transformation einer Farbvalenz $\vec{C}$ aus dem instrumentellen Primärvalenzsystem des DFM-Gerätes in das Normvalenzsystem CIE 1931 erfolgt durch Multiplikation der im (D,E,F)-System gemessenen Farbvalenz $\vec{C} = D \cdot \vec{D} + E \cdot \vec{E} + F \cdot \vec{F}$ sowohl mit der Diagonalmatrix M_D (vgl. 4.3.1.) als auch mit der Matrix M, also

$$
\vec{C} = M \cdot M_D \cdot \begin{bmatrix} D \\ E \\ F \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} B \\ G \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}.
$$

Die zu M inverse Matrix M^{-1} beschreibt das Gleichungssystem, das benötigt wird, um Normfarbwerte und Normspektralwertfunktionen in das BGR-System zu transformieren:

$$
\begin{aligned}
B &= 0{,}0260179 \cdot X - 0{,}0689353 \cdot Y + 1{,}4079632 \cdot Z; \\
G &= -1{,}1471605 \cdot X + 3{,}0394394 \cdot Y + 0{,}0905992 \cdot Z; \\
R &= 2{,}0499256 \cdot X - 0{,}4003416 \cdot Y - 0{,}3427378 \cdot Z;
\end{aligned}
\tag{17}
$$

Es gilt

$$
\vec{C} = M^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ G \\ R \end{bmatrix}.
$$

4.4. Helligkeitsabgleiche nach dem Kriterium "Minimale Trennliniendeutlichkeit" (Minimally Distinct Border) und dem Direktvergleich-Kriterium

4.4.1. Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte über direkten Abgleich der einzelnen Primärvalenzen mit einem Testreiz

Das Prinzip der Leuchtdichtebeiwertbestimmung besteht bei dieser Methode darin, daß drei Farbvalenzen, welche jeweils durch die Strahlung einer einzelnen Primärvalenz erzeugt werden, also

$$\begin{aligned} \vec{C}_D &= D\,\vec{D}; \\ \vec{C}_E &= E\,\vec{E}; \\ \vec{C}_F &= F\,\vec{F}; \end{aligned} \qquad (18)$$

mit einem festen gelben Testreiz $\vec{C}_o$ verglichen werden. Der Testreiz wird im linken Photometerhalbfeld vorgegeben und durch ausschließliche Helligkeitsvariation an der BRODHUN-Sektorenmeßvorrichtung (BSM) mit den Primärvalenzstrahlungen (als Vergleichsreize im rechten Halbfeld vorgegeben) nach dem MDB- und dem DV-Kriterium abgeglichen. Die Helligkeitswerte H an der BSM des Testreizes $\vec{C}_o$ stellen nach entsprechender Umrechnung (vgl. 4.4.1.2.) ein direktes Maß für die Leuchtdichtebeiwerte der instrumentellen Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$ und $\vec{F}$ dar. Diese Leuchtdichtebeiwerte werden mit Hilfe des Gleichungssystems (13a) (vgl. 4.3.2.) in die Leuchtdichtebeiwerte des WRIGHTschen (B,G,R)-Systems umgerechnet.

Für das praktische Vorgehen wurden für die Primärvalenzreize $\vec{C}_D$, $\vec{C}_E$ und $\vec{C}_F$ die Farbwerte D = 90, E = 35 und F = 55 gewählt. Dadurch mußte der Testreiz $\vec{C}_o$ etwa auf die Helligkeit H = 50 eingestellt werden, um annähernd die gleiche Helligkeit wie das rechte Photometerhalbfeld anzunehmen. Für den Abgleich von $\vec{C}_o$ war so im oberen und unteren Skalenbereich der BSM ausreichend Spielraum.

3.1.1. Meßvorgang

Der Helligkeitsabgleich wurde von der VP durch langsam pendelnde Variation der Testreizhelligkeit an der BSM-Vorrichtung vollzogen. Dabei sollte durch schrittweise Einengung der Änderungsamplitude die Einstellung gefunden werden, bei der die Trennlinie zwischen beiden Feldern minimale Deutlichkeit annahm oder - bei Anwendung des DV-Kriteriums - beide Felder subjektiv gleichhell erschienen. Das Abgleichverfahren erforderte also kein eigentliches Gleichheitsurteil von der Versuchsperson, sondern vielmehr das Auffinden eines Minimums oder den Ausschluß von Ungleichheiten. Für jede Primärvalenz wurden 5 Abgleiche nach dem MDB-Kriterium und 5 Abgleiche nach dem DV-Kriterium durchgeführt. Die Ergebnisse wurden gemittelt und für beide Methoden getrennt als Helligkeitswerte H_D, H_E und H_F registriert.

4.4.1.2. Berechnung der Leuchtdichtebeiwerte

δ', ε' und φ' seien im folgenden die noch nicht normierten Leuchtdichtebeiwerte des instrumentellen Primärvalenzsystems. Damit lassen sich die Gleichungen für die Leuchtdichten der verwendeten Farbreize $\overrightarrow{C_D}$, $\overrightarrow{C_E}$ und $\overrightarrow{C_F}$ formulieren:

$$L_D = \delta' \cdot D;$$
$$L_E = \varepsilon' \cdot E;$$
$$L_F = \varphi' \cdot F;$$

(mit D = 90; E = 35; F = 55).

Zu den Leuchtdichten L_D, L_E und L_F sind die Helligkeitswerte H_D, H_E und H_F proportional. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$L_D = \delta' \cdot D = C \cdot H_D;$$
$$L_E = \varepsilon' \cdot E = C \cdot H_E;$$
$$L_F = \varphi' \cdot F = C \cdot H_F;$$

oder

$$\delta' = C \cdot \frac{H_D}{D};$$
$$\varepsilon' = C \cdot \frac{H_E}{E}; \qquad (18a)$$
$$\varphi' = C \cdot \frac{H_F}{F}; \quad \text{mit } C = \text{konst.}$$

Durch Division dieser Gleichungen durch ε' erhält man die normierten Leuchtdichtebeiwerte δ, ε und φ des instrumentellen Primärvalenzsystems:

$$\delta = \frac{H_D}{H_E} \cdot \frac{E}{D};$$

$$(19) \quad \varepsilon = 1 \quad ;$$

$$\varphi = \frac{H_F}{H_E} \cdot \frac{E}{F}; \quad \text{(mit D = 90; E = 35; F = 55).}$$

Für den Übergang zu den Leuchtdichtebeiwerten β, γ und ϱ des WRIGHTschen (B,G,R)-Systems sei die Leuchtdichtegleichung einer beliebigen Farbvalenz $\vec{C} = B\cdot\vec{B} + G\cdot\vec{G} + R\cdot\vec{R}$ betrachtet; diese Gleichung lautet

$$(20) \quad L = \beta\cdot B + \gamma\cdot G + \varrho\cdot R.$$

Berücksichtigt man die Umrechnungsgleichungen

$$B = k_1 \cdot D;$$
$$G = E;$$
$$R = k_2 \cdot F;$$

und ersetzt die Farbwerte in der Leuchtdichtegleichung (20), so erhält man die Leuchtdichte der Farbvalenz $\vec{C}$ als Linearkombination der Farbwerte des instrumentellen Primärvalenzsystems:

$$L = \beta\cdot k_1\cdot D + \gamma\cdot E + \varrho\cdot k_2\cdot F.$$

Zwischen den Leuchtdichtebeiwerten beider Systeme zeigt sich also folgende Beziehung:

$$\beta = \frac{1}{k_1} \cdot \delta;$$

$$(21) \quad \gamma = \varepsilon;$$

$$\varrho = \frac{1}{k_2} \cdot \varphi; \qquad \text{(vgl. 4.3.2., Gl. 13a).}$$

Unter Berücksichtigung von Gleichungssystem (19) und der Bestimmungsgleichungen von k_1 und k_2 (vgl. 4.3.2., Gl. (13)) erhält man die endgültigen Formeln für die Leuchtdichtebeiwerte:

$$\beta = \frac{H_D}{H_E} \cdot \frac{E}{D} \cdot \frac{D_{494}}{E_{494}} ;$$

(22) $$\gamma = 1;$$

$$\delta = \frac{H_F}{H_E} \cdot \frac{E}{F} \cdot \frac{F_{583}}{E_{583}};$$

(mit D = 90; E = 35; F = 55).

.1.3. Fehlerrechnung: Die Größen H_D, H_E, H_F, D_{494}, E_{494}, E_{583} und F 583 werden anhand von Mehrfachmessungen experimentell bestimmt und gemittelt. Für jede Meßgröße wird die Standardabweichung s des Mittelwertes berechnet. Die Standardabweichung der Leuchtdichtebeiwerte ergibt sich aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz (90 , S. 11 ff.)

$$s_\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial\beta}{\partial H_D}\right)^2 \cdot s_{H_D}^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial H_E}\right)^2 \cdot s_{H_E}^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial D_{494}}\right)^2 \cdot s_{D_{494}}^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial E_{494}}\right)^2 \cdot s_{E_{494}}^2} \;;$$

$$s_\gamma = 0;$$

$$s_\varrho = \sqrt{\left(\frac{\partial\beta}{\partial H_F}\right)^2 \cdot s_{H_F}^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial H_E}\right)^2 \cdot s_{H_E}^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial F_{583}}\right)^2 \cdot s_{F_{583}}^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial E_{583}}\right)^2 \cdot s_{E_{583}}^2} \;;$$

Unter Berücksichtigung von Gleichungssystem (22) und nach passender Umrechnung erhält man daraus

$$s_\beta = \beta \cdot \sqrt{\left(\frac{s_{H_D}}{H_D}\right)^2 + \left(\frac{s_{H_E}}{H_E}\right)^2 + \left(\frac{s_{D_{494}}}{D_{494}}\right)^2 + \left(\frac{s_{E_{494}}}{E_{494}}\right)^2} \;;$$

(23) $s_\gamma = 0;$

$$s_\varrho = \varrho \sqrt{\left(\frac{s_{H_F}}{H_F}\right)^2 + \left(\frac{s_{H_E}}{H_E}\right)^2 + \left(\frac{s_{F_{583}}}{F_{583}}\right)^2 + \left(\frac{s_{E_{583}}}{E_{583}}\right)^2} \;.$$

Als Grundlage für die Fehlerrechnung dient also Gleichungssystem (22). Hierin sind die Größen H_D, H_E, H_F, D_{494}, E_{494}, E_{583} und F_{583} variabel; sie müssen demnach bei der Fehlerrechnung berücksichtigt werden. Die Größen D, E und F sind hingegen konstant, weshalb die entsprechenden Glieder bei der Fehlerrechnung fehlen.

4.4.2. Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte über die Messung zweier leuchtdichtefreier Quervektoren im Farbenraum

Bei dieser Methode stützt man sich auf die Möglichkeit, experimentell im Farbenraum eine Ebene zu bestimmen, in der alle Farbvalenzvektoren gleicher konstanter Helligkeit enden. SCHRÖDINGER (69) hat dafür den Begriff "Isolychne" eingeführt. Die Gleichung einer solchen Ebene beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen den drei variablen Farbwerten B, G und R. In der allgemeinen heterogenen Form lautet sie

$$A_1 \cdot B + A_2 \cdot G + A_3 \cdot R = A_o. \qquad (24)$$

Bringt man diese Ebene mit den Achsen des Farbenraumes zum Schnitt (Abb. 5), so erhält man drei Achsenabschnittspunkte, deren Ortsvektoren $\vec{S}_1$, $\vec{S}_2$ und $\vec{S}_3$ sich als Produkt aus jeweils einer Primärvalenz und einem dazugehörigen Farbwert darstellen lassen:

$$\begin{aligned} \vec{S}_1 &= B \cdot \vec{B}; \\ \vec{S}_2 &= G \cdot \vec{G}; \\ \vec{S}_3 &= R \cdot \vec{R}. \end{aligned} \qquad (25)$$

Die Farbwerte dieser Vektoren lassen sich aus Gleichung (24) bestimmen, indem die beiden nicht gesuchten Farbwerte jeweils gleich Null gesetzt werden. Man erhält

$$B = \frac{A_o}{A_1};$$

$$G = \frac{A_o}{A_2};$$

$$R = \frac{A_o}{A_3}.$$

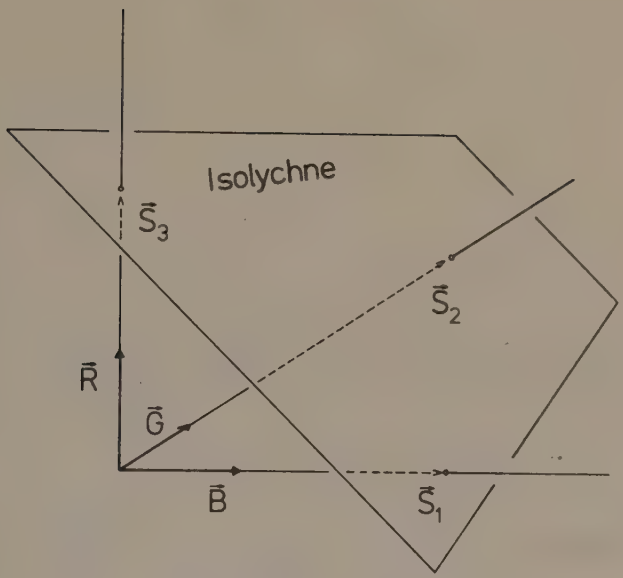


Abb. 5: Farbenraum mit einer eingezeichneten Ebene gleicher Helligkeit (Isolychne). $\vec{B},\vec{G},\vec{R}$: Primärvalenzvektoren; $\vec{S}_1$, $\vec{S}_2$, $\vec{S}_3$: Ortsvektoren der Achsenabschnittspunkte.

Die Leuchtdichtegleichungen der Vektoren $\vec{S}_1$, $\vec{S}_2$ und $\vec{S}_3$ lauten also

$$L_1 = \beta \cdot B = \beta \cdot \frac{A_o}{A_1};$$

$$L_2 = \gamma \cdot G = \gamma \cdot \frac{A_o}{A_2}; \qquad (26)$$

$$L_3 = \varsigma \cdot R = \varsigma \cdot \frac{A_o}{A_3}.$$

Da die Ortsvektoren $\vec{S}_1$, $\vec{S}_2$ und $\vec{S}_3$ auf ein und derselben Isolychne liegen, besitzen sie die gleiche Leuchtdichte L. Es gilt also

$$L = L_1 = L_2 = L_3. \qquad (27)$$

Mit Gl. (26) kann man damit folgenden Zusammenhang darstellen:

$$L = \beta \cdot \frac{A_o}{A_1} = \gamma \cdot \frac{A_o}{A_2} = \varsigma \cdot \frac{A_o}{A_3};$$

oder

$$A_1 = \beta \cdot \frac{A_o}{L};$$

$$A_2 = \gamma \cdot \frac{A_o}{L}; \qquad (28)$$

$$A_3 = \varsigma \cdot \frac{A_o}{L}.$$

Durch Einsetzen dieser Faktoren in Gleichung (24) läßt sich diese umformen in

$$\beta \cdot \frac{A_o}{L} \cdot B + \gamma \cdot \frac{A_o}{L} \cdot G + \varsigma \cdot \frac{A_o}{L} \cdot R = A_o; \qquad \text{oder}$$

(29) $L = \beta \cdot B + \gamma \cdot G + \varrho \cdot R.$

Diese Gleichung stellt den allgemeinen Ausdruck für die Berechung der Leuchtdichte L einer beliebigen Farbvalenz $\vec{F} = B \cdot \vec{B} + G \cdot \vec{G} + R \cdot \vec{R}$ dar. Es ist die bekannte, in Kap. 2.2. eingeführte ABNEYsche Gleichung.

Aus der Identität von Gleichung (24) und Gleichung (29) wird deutlich, daß es zulässig ist, die Konstanten A_1, A_2 und A_3 von Gleichung (24) als Leuchtdichtebeiwerte aufzufassen. Die Bestimmung einer Ebene gleicher Helligkeit im Farbenraum bedeutet also zugleich Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte des zugrundeliegenden Primärvalenzsystems. Die Konstante A_0 in Gl. (24) stellt die Leuchtdichte derjenigen Isolychne dar, die durch Gl. (24) beschrieben wird.

Setzt man $A_0 = 0$, so erhält man die homogene Form der Ebenengleichung

(30) $A_1 \cdot B + A_2 \cdot G + A_3 \cdot R = 0.$

Die Ebene, die durch diese Gleichung beschrieben ist, enthält im Gegensatz zu einer Isolychne die Origo oder den Schwarzpunkt. In ihr liegen alle leuchtdichtefreien Farbvalenzvektoren, weshalb sie von SCHRÖDINGER (69) mit "Alychne" bezeichnet wurde. Mit den Leuchtdichtebeiwerten β, γ und ϱ lautet die Alychengleichung

(31) $\beta \cdot B + \gamma \cdot G + \varrho \cdot R = 0.$

Die experimentelle Bestimmung der leuchtdichtefreien Ebene im Farbenraum und damit der Leuchtdichtebeiwerte erfolgt durch die Festlegung zweier leuchtdichtefreier - und daher virtueller - Farbvalenzvektoren. Diese werden als Differenzvektoren zwischen je zwei auf gleiche Helligkeit abgeglichenen Farbvalenzen ermittelt und im folgenden als "Quervektoren" bezeichnet.

4.4.2.1. Meßvorgang

Im linken Photometerhalbfeld des DFM-Gerätes wird ein Farbreiz $\vec{C}_o$ vorgegeben, der bei einer festen Helligkeitseinstellung H_o an der BSM-Vorrichtung im rechten Halbfeld mit Hilfe der Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$ und $\vec{F}$ mehrfach nachgemischt wird. Man erhält so die Farbvalenz $\vec{C}_o = D_o \cdot \vec{D} + E_o \cdot \vec{E} + F_o \cdot \vec{F}$, bezogen auf die Helligkeitseinstellung H_o. Diese Fabvalenz wird mit mehreren von ihr deutlich verschiedenen Farbvalenzen $\vec{C}_i$, die im rechten Photometerhalbfeld vorgegeben werden, auf gleiche Helligkeit abgeglichen. Dabei bleibt das rechte Halbfeld jeweils konstant, während $\vec{C}_o$ durch Variation an der BSM-Vorrichtung in der Helligkeit angepaßt wird. Die Helligkeitseinstellung, die für den Abgleich von $\vec{C}_o$ mit $\vec{C}_i$ benötigt wird, sei H_i; die Einstellung, welche für den Abgleich von $\vec{C}_o$ mit $\vec{C}_j$ benötigt wird, sei Hj.

Bei der Versuchsdurchführung wurde der Testreiz - die Farbvalenz $\vec{C}_o$ - mit insgesamt 6 verschiedenen Vergleichsreizen $\vec{C}_i$ (i = 1,2 ... 6) sowohl nach dem MDB- als auch nach dem DV-Kriterium mehrfach abgeglichen. Aus den Mittelwerten der Abgleiche ließen sich 6 verschiedene Quervektoren, $\vec{D}_i$ (für MDB) und $\vec{Q}_i$ (für DV) mit i = 1,2 ... 6, berechnen, aus welchen man je $\binom{6}{2}$ = 15 verschiedene Quervektorenpaare $\vec{D}_i/\vec{D}_j$ und $\vec{Q}_i/\vec{Q}_j$ (i = 1,2 ... 6; j = 1,2 ... 6; mit i ≠ j) zusammenstellen konnte. Jede dieser Kombinationen diente als Grundlage für eine eigene Berechnung der Leuchtdichtebeiwerte ß, γ und ϱ. Es konnten also für jedes Kriterium insgesamt 15 Tripel an Leuchtdichtebeiwerten bestimmt werden.

.2.2. Berechnung der Leuchtdichtebeiwerte

Durch Umrechnung von $\vec{C}_o$ auf die Helligkeiten H_i und H_j erhält man die mit $\vec{C}_i$ und $\vec{C}_j$ gleichhellen, zu $\vec{C}_o$ artgleichen Farbvalenzen $\vec{C}_m$ und $\vec{C}_n$. Es gilt

$$\vec{C}_m = \vec{C}_o \cdot \frac{H_i}{H_o} \quad ; \quad \text{mit} \quad \vec{C}_m \triangleq \vec{C}_i;$$

$$\vec{C}_n = \vec{C}_o \cdot \frac{H_j}{H_o} \quad ; \quad \text{mit} \quad \vec{C}_n \triangleq \vec{C}_j.$$

Aus den gleichhellen Farbvalenzen können die leuchtdichtefreien Quervektoren $\vec{D}_i$ bzw. $\vec{Q}_i$ und $\vec{D}_j$ bzw. $\vec{Q}_j$ ermittelt werden. Sie lauten für das MDB-Kriterium

$$\vec{D}_i = \vec{C}_m - \vec{C}_i = \vec{C}_o \cdot \frac{H_i}{H_o} - \vec{C}_i;$$

$$\vec{D}_j = \vec{C}_n - \vec{C}_j = \vec{C}_o \cdot \frac{H_j}{H_o} - \vec{C}_j;$$

$$\vec{D}_i = \begin{bmatrix} D_o \\ E_o \\ F_o \end{bmatrix} \cdot \frac{H_i}{H_o} - \begin{bmatrix} D_i \\ E_i \\ F_i \end{bmatrix} \quad ;$$

$$\vec{D}_j = \begin{bmatrix} D_o \\ E_o \\ F_o \end{bmatrix} \cdot \frac{H_j}{H_o} - \begin{bmatrix} D_j \\ E_j \\ F_j \end{bmatrix} \quad ;$$

Die Alychnengleichung stellt sich dann in Vektorschreibweise folgendermaßen dar:

$$(32) \qquad \vec{C} = u \cdot \vec{D}_i + v \cdot \vec{D}_j$$

u und v sind freie Parameter. Werden $\vec{D}_i$ und $\vec{D}_j$ in das (B,G,R)-System umgerechnet, so läßt sich Gleichung (32)

in folgende drei skalare Gleichungen ausschreiben

$$(33) \qquad B = u \cdot B_i + v \cdot B_j;$$

$$(34) \qquad G = u \cdot G_i + v \cdot G_j;$$

$$(35) \qquad R = u \cdot R_i + v \cdot R_j.$$

Durch Elimination der freien Parameter u und v erhält man die gewünschte lineare Beziehung zwischen den drei Farbwerten B, G und R. Dazu werden u und v aus den Gleichungen (33) und (34) mittels Determinantenrechnung (4 , S. 5 ff.) bestimmt und in Gleichung (35) eingesetzt. Es gilt

$$u = \frac{A_1}{A};$$

$$v = \frac{A_2}{A};$$

mit

$$A = \begin{vmatrix} B_i & B_j \\ G_i & G_j \end{vmatrix} = B_i G_j - G_i B_j;$$

$$A_1 = \begin{vmatrix} B & B_j \\ G & G_j \end{vmatrix} = B G_j - G B_j;$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} B_i & B \\ G_i & G \end{vmatrix} = B_i G - G_i B;$$

und damit

$$u = \frac{B G_j - G B_j}{B_i G_j - G_i B_j};$$

$$v = \frac{B_i G - G_i B}{B_i G_j - G_i B_j}.$$

Gleichung (35) lautet dann

$$(35)' \quad R = \frac{BG_j - GB_j}{B_iG_j - G_iB_j} \cdot R_i + \frac{B_iG - G_iB}{B_iG_j - G_iB_j} \cdot R_j .$$

Durch Ausklammern der Farbwerte erhält man die Alychnengleichung:

$$(R_iG_j - R_jG_i) \cdot B + (B_iR_j - B_jR_i) \cdot G + (G_iB_j - G_jB_i) \cdot R = 0 ;$$

Als Leuchtdichtebeiwerte erhält man also

$$\beta' = R_iG_j - R_jG_i;$$

$$\gamma' = B_iR_j - B_jR_i;$$

$$\varsigma' = G_iB_j - G_jB_i;$$

Durch Normierung auf $\gamma = 1$:

$$\beta = \frac{R_iG_j - R_jG_i}{B_iR_j - B_jR_i};$$

$$(36) \quad \gamma = 1;$$

$$\varsigma = \frac{G_iB_j - G_jB_i}{B_iR_j - B_jR_i} ; \text{ mit } \vec{D}_i = \begin{bmatrix} B_i \\ G_i \\ R_i \end{bmatrix} ; \vec{D}_j = \begin{bmatrix} B_j \\ G_j \\ R_j \end{bmatrix} .$$

4.4.2.3. Fehlerrechnung

Die Berechnung der Standardabweichungen der Leuchtdichtebeiwerte erfolgt wieder über das Fehlerfortpflanzungsgesetz (90 , S. 11 ff.). Um die Streuungen der Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ zu ermitteln, müssen die Größen berücksichtigt werden, die mit Meßfehlern behaftet sind. Es handelt sich um die Farbwerte des Testreizes $\vec{C}_o$, die Helligkeitswerte H_i und H_j und - zur Bestimmung der Umrechnungsfaktoren k_1 und k_2 (vgl. 4.3.2.) - die Spektralwerte D_{494}, E_{494}, F_{583} und E_{583}. Unter Verwendung dieser Größen lauten die Gleichungen der Leuchtdichtebeiwerte

$$(37)\quad \beta = \frac{E_o(F_jH_i - F_iH_j) + F_o(E_iH_j - E_jH_i) + H_o(F_iE_j - F_jE_i)}{F_o(D_jH_i - D_iH_j) + D_o(F_iH_j - F_jH_i) + H_o(D_iF_j - D_jF_i)} \cdot \frac{D_{494}}{E_{494}};$$

$$(38)\quad \gamma = 1{,}0;$$

$$(39)\quad \varrho = \frac{D_o(E_jH_i - E_iH_j) + E_o(D_iH_j - D_jH_i) + H_o(E_iD_j - E_jD_i)}{F_o(D_jH_i - D_iH_j) + D_o(F_iH_j - F_jH_i) + H_o(D_iF_j - D_jF_i)} \cdot \frac{F_{583}}{E_{583}};$$

Die Standardabweichungen s_β und s_ϱ werden nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz mit Hilfe des vollständigen Differentials der Gleichungen (37) und (39) berechnet. Man erhält:

$$(40)\quad s_\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial\beta}{\partial D_o}\right)^2 \cdot s^2_{D_o} + \left(\frac{\partial\beta}{\partial E_o}\right)^2 \cdot s^2_{E_o} + \left(\frac{\partial\beta}{\partial F_o}\right)^2 \cdot s^2_{F_o} + \left(\frac{\partial\beta}{\partial H_i}\right)^2 \cdot s^2_{H_i} + \left(\frac{\partial\beta}{\partial H_j}\right)^2 \cdot s^2_{H_j} + \left(\frac{\partial\beta}{\partial D_{494}}\right)^2 \cdot s^2_{D_{494}} + \left(\frac{\partial\beta}{\partial E_{494}}\right)^2 \cdot s^2_{E_{494}}};$$

$$s = 0;$$

$$(41)\quad s_S = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{D_o}\right)^2 \cdot s^2_{D_o} + \left(\frac{\partial S}{E_o}\right)^2 \cdot s^2_{E_o} + \left(\frac{\partial S}{F_o}\right)^2 \cdot s^2_{F_o} + \left(\frac{\partial S}{H_i}\right)^2 \cdot s^2_{H_i} + \left(\frac{\partial S}{H_j}\right)^2 \cdot s^2_{H_j} + \left(\frac{\partial S}{F_{583}}\right)^2 \cdot s^2_{F_{583}} + \left(\frac{\partial S}{E_{583}}\right)^2 \cdot s^2_{F_{583}}} .$$

4.5. Bestimmung von Farbreizen, die im heterochromen Helligkeitsvergleich zu vorgegebenen Farbreizen minimale Trennlinien-deutlichkeit ergeben

Bei der folgenden Untersuchung wurden zu Beginn deutlich heterochrome Farbreize in beiden Photometerhalbfeldern des DFM-Gerätes vorgegeben, welche durch die Wahl ihrer Farbart imstande waren, unterschiedliche Erregungen in beiden Farbübertragungskanälen hervorzurufen. Die Farbart des linken Halbfeldes wurde während der Messung konstant gehalten, während die des rechten Feldes variierbar war. Durch geeignete Veränderung des Grünanteiles des rechten Farbreizes konnte bei gleichzeitiger Anpassung der Helligkeit des linken Feldes eine Einstellung gefunden werden, bei der die Trennlinie minimale Deutlichkeit annahm, obwohl beide Felder weiterhin heterochrom erschienen. Solche Einstellungen wurden für verschiedene konstante Farbreize des linken Halbfeldes und für unterschiedlich große Farbdifferenzen zwischen beiden Feldern bestimmt. Die Ergebnisse wurden in der Farbtafel dargestellt Bei der Auswertung lag das besondere Interesse darauf, inwiefern sich in diesen Einstellungen Eigenheiten des spatialen Auflösungsvermögens widerspiegeln.

Im folgenden sei der eigentliche Meßvorgang näher erläutert: mittels Interferenzfilter werden monochromatische oder fast monochromatische Farbreize im Bereich von λ = 565 nm und λ = 610 nm als Testreize (T_1 bis T_4 in Abb. 17) im linken Photometerhalbfeld vorgegeben. Zur Bestimmung ihrer Farbwerte werden diese Reize im rechten Photometerhalbfeld mittels der instrumentellen Primärvalenzen mehrfach nachgemischt. Dabei wird ein vollständiger isochromer Abgleich angestrebt, bei dem sich beide Felder für die trichromatische Versuchsperson nicht mehr unterscheiden lassen. Dann wird der Betrag der blauen Primärvalenz $\vec{D}$ für das rechte Halbfeld soweit vergrößert, bis sich dieses deutlich heterochrom vom linken unterscheidet. Diese Blau-Einstellung und die Einstellung der "roten"

Primärvalenz $\vec{F}$ bleiben nun für den weiteren Verlauf der Messung konstant, während weiterhin die "grüne" Primärvalenz $\vec{E}$ variiert wird. So kann die Farbe des rechten Vergleichsfeldes durch ausschließliche Bestätigung des "grünen" Drehknopfes entlang einer festen Geraden (z.B. CL in Abb. 17) in der Farbtafel verändert werden. Die Gerade verläuft durch den Farbort der "grünen" Primärvalenz $\vec{E}$ oder - auf die Farbtafel des WRIGHTschen (B,G,R)-Systems bezogen - der Primärvalenz $\vec{G}$. Die Aufgabe der Versuchsperson besteht darin, durch Variation des Vergleichsreizes entlang einer solchen Geraden und durch Veränderung der Helligkeit des Testreizes eine Farbvalenz zu finden, die mit dem Testreiz eine minimale Trennlinie erzeugt.

Dazu wurde zunächst die "grüne" Primärvalenz $\vec{E}$ für das rechte Photometerhalbfeld so eingestellt, daß die Trennlinie zwischen beiden Feldern bereits möglichst geringe (= schlechte) Deutlichkeit annahm. War diese Einstellung gefunden, so bedeutete jedes weitere Abweichen zu größeren oder kleineren Grünwerten eine Zunahme der Trennliniendeutlichkeit. Eine weitere Abnahme der Deutlichkeit konnte nur noch durch Angleichen der Helligkeit des linken an das rechte Halbfeld erreicht werden. Als Abgleichkriterium galt wiederum das maximale Verschwimmen der Trennlinie. War der Helligkeitsabgleich vollzogen, so konnte u.U. erneut eine leichte Verminderung der Trennliniendeutlichkeit erzielt werden, wenn man die "grüne" Primärvalenz gering änderte. Das Angleichen des Grünwertes und der Helligkeit wurde im Wechsel solange wiederholt, bis durch keine Veränderung der beiden Größen die Trennliniendeutlichkeit weiter verringert werden konnte. Dieser Meßvorgang wurde insgesamt fünf mal wiederholt und die Ergebnisse registriert. Dann wurde der Beitrag der "blauen" Primärvalenz im rechten Photometerhalbfeld weiter vergrößert, so daß sich der Vergleichsreiz vom Testreiz noch stärker unterschied als in der Meßreihe zuvor. Wieder wurden fünf Abgleiche in der beschriebenen Weise vorgenommen und danach der Blauwert weiter erhöht. Zu jedem Testreiz $\vec{T}_i$

(i = 1,2,3,4) wurden bei mindestens vier verschiedenen Blauwerten des Vergleichsreizes Abgleiche vorgenommen, so daß je Testreiz mindestens 20 verschiedene Abgleiche nach dem Kriterium der minimalen Trennliniendeutlichkeit durchgeführt wurden.

4.6. Bestimmung der Spektralwertfunktionen

Für die Bestimmung der Spektralwertfunktionen wurden insgesamt 15 verschiedene monochromatische Farbreize - realisiert durch Interferenzfilter (Hersteller: Jenaer Glaswerk Schott & Gen., Mainz) - verwendet. Die Reize waren identisch mit denen, die später auch für die Aufstellung der Hellempfindlichkeitsfunktion (vgl. 4.7.) herangezogen wurden. Da aus Intensitätsgründen die Helligkeitsabgleiche für Wellenlängen unterhalb 460 nm nicht mehr vollzogen werden konnten, beschränkt sich die Bestimmung der Spektralwertfunktionen auf den Bereich von λ = 462 nm bis λ = 652 nm.

Zur Messung werden die Interferenzfilter in den Probenstrahlengang des DFM-Gerätes eingesetzt, so daß ihre Farbreize im linken Photometerhalbfeld erscheinen. Die BSM-Vorrichtung wird für alle Messungen auf der Einstellung H = 80 konstant gehalten. Im rechten Halbfeld werden die Farbreize mittels der Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$ und $\vec{F}$ isochrom nachgemischt als $\vec{C}\,(\lambda) = D\,(\lambda)\cdot\vec{D} + E\,(\lambda)\cdot\vec{E} + F\,(\lambda)\cdot\vec{F}$. Jeder monochromatische Farbreiz wird fünf mal bestimmt, und die Ergebnisse mit Hilfe der Umrechnungsfaktoren k_1 und k_2 (Gl. (13a, 4.3.2.) in das WRIGHTsche (B,G,R)-System umgerechnet.

Da sich die gesuchten Spektralwertfunktionen $\bar{b}\,(\lambda)$, $\bar{g}\,(\lambda)$ und $\bar{r}\,(\lambda)$ auf ein äquienergetisches Spektrum beziehen sollten, wurde für jeden Farbreiz mit Hilfe eines Radiometers die Strahldichte $S(\lambda)$ gemessen, und zwar - bis auf die Entfernung des Okulars - genau bei der Meßanordnung, bei der auch die isochromen Farbabgleiche vorgenommen wurden. Die Größe der - auf ein äquienergetisches Spektrum normierten - Spektralwerte ergibt sich aus der Division der gemessenen Farbwerte durch die zugehörigen Strahldichten:

$$\bar{b}(\lambda) = \frac{B(\lambda)}{S(\lambda)} \; ;$$

$$(42) \quad \bar{g}(\lambda) = \frac{G(\lambda)}{S(\lambda)} \; ;$$

$$\bar{r}(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{S(\lambda)} \; ;$$

Die spektralen Farbwertanteile $b(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $r(\lambda)$ können dagegen auch gemäß

$$b(\lambda) = \frac{B(\lambda)}{B(\lambda) + G(\lambda) + R(\lambda)} \; ;$$

$$(43) \quad g(\lambda) = \frac{G(\lambda)}{B(\lambda) + G(\lambda) + R(\lambda)} \; ;$$

$$r(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{B(\lambda) + G(\lambda) + R(\lambda)} \; .$$

berechnet werden. Sie können also unabhängig von der Bestimmung der spektralen Strahlungsverteilung ermittelt werden.

4.7. Bestimmung der Hellempfindlichkeitsfunktion unter Verwendung des MDB-Kriteriums

Für die heterochromen Helligkeitsabgleiche zur Bestimmung der Hellempfindlichkeitsfunktion wurden 15 verschiedene monochromatische Farbreize im Bereich von 462 nm bis 652 nm (vgl. 4.6.) im linken Photometerhalbfeld des DFM-Meßgerätes als Vergleichsreize $\vec{C}(\lambda)$ vorgegeben. Sie waren über die Variation am Schwenkhebel der BSM-Vorrichtung in der Helligkeit variabel. Im rechten Halbfeld wurde ein weißer Farbreiz als Testreiz $\vec{W} = D_W \cdot \vec{D} + E_W \cdot \vec{E} + F_W \cdot \vec{F}$ eingestellt, der während aller Abgleiche konstant gehalten wurde. Die Farbart dieses Testreizes war so festgelegt worden, daß sie zum einen auf der tritanopischen neutralen Zone lag, zum anderen für die trichromatische VP weder bläulich noch gelblich erschien. Dazu wurde am DFM-Gerät die Einstellung $D_W = 7{,}7$; $E_W = 5{,}0$ und $F_W = 2{,}8$ ermittelt. Sie blieb während der Abgleiche auch in der Helligkeit unverändert.

Der Helligkeitsabgleich zwischen beiden Halbfeldern erfolgte wieder über eine pendelnde Veränderung an der BSM-Vorrichtung. Dabei wurde jeweils die Helligkeitseinstellung $H(\lambda)$ gesucht, bei der die Trennlinie zwischen beiden Feldern minimale Deutlichkeit annahm. Für jeden Vergleichsreiz $\vec{C}(\lambda)$ wurden je fünf Einzelabgleiche in fünf verschiedenen Sitzungen vorgenommen, so daß die gesamte Anzahl der Abgleiche 25 pro Reiz beträgt.

Zur Normierung auf ein äquienergetisches Spektrum wurden - wie bei der Bestimmung der Spektralwertfunktionen (vgl. 4.6.) - die Strahldichte $S(\lambda)$ der einzelnen Vergleichsreize $\vec{C}(\lambda)$ bei $H(\lambda) = 100$ gemessen. Die Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$ der VP ergibt sich dann als reziprokes Produkt der Helligkeitswerte $H(\lambda)$ und der Strahldichte $S(\lambda)$, also

$$(44) \qquad v(\lambda) = \frac{1}{H(\lambda) \cdot S(\lambda)}.$$

4.8. Bestimmung der Schätzfunktion der spektralen Distinktibilität

Um den Begrffiff "spektrale Distinktibilität" näher zu erläutern, sei noch einmal auf die Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$ (vgl. 4.7.) zurückgegriffen. War ein Vergleichsreiz $\vec{C}(\lambda)$ mit dem konstanten weißen Testreiz auf gleiche Helligkeit nach dem MDB-Kriterium abgeglichen, so resultierte meist eine noch deutlich wahrnehmbare Trennlinie zwischen beiden Feldern. Das Ausmaß dieser verbleibenden Trennliniendeutlichkeit zeigte eine Abhängigkeit von der Wellenlänge der monochromatischen Vergleichsreize $\vec{C}(\lambda)$, welche im linken Photometerhalbfeld vorgegeben waren. Wird die Trennliniendeutlichkeit für jeden Vergleichsreiz $\vec{C}(\lambda)$ vom Beobachter geschätzt und werden diese Schätzwerte gegenüber der Wellenlänge der Vergleichsreize aufgetragen, so erhält man eine Funktion, welche die Abhängigkeit der Trennlinie von der Wellenlänge beschreibt. Diese Funktion soll "Funktion der spektralen Distinktibilität $\delta(\lambda)$" genannt werden.

Beim praktischen Vorgehen wurde zunächst für jeden Vergleichsreiz $\vec{C}(\lambda)$ der Helligkeitsabgleich nach dem MDB-Kriterium fünf mal durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt (vgl. 4.7.) Dann wurde die BSM-Vorrichtung auf diesen mittleren Helligkeitswert eingestellt und anschließend die Trennliniendeutlichkeit von der Versuchsperson auf einer 7-stufigen Skala geschätzt. Dabei handelt es sich um ein kategoriales Schätzverfahren (72), d.h. der Beobachter ordnet die Trennliniendeutlichkeit in eine von 7 Deutlichkeitskategorien zwischen zwei Ankerreizen ein. Der Schätzwert "0" bedeutet völliges oder nahezu völliges Verschwinden der Trennlinie, während der Schätzwert "7" einer maximalen Trennliniendeutlichkeit entspricht. In fünf verschiedenen Sitzungen wurde je ein Schätzwert pro Vergleichsreiz bestimmt, so daß eine Gesamtzahl von 5 Distinktibilitätsschätzungen pro gemessener Wellenlänge resultierte.

5. Ergebnisse

5.1. Spektralwertfunktionen

Abb. 6 zeigt die gemessenen Spektralwertfunktionen $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ der Versuchsperson. Sie wurden für den Spektralbereich bestimmt, in dem auch die Distinktibilitätsschätzung (vgl. 4.8.) durchgeführt werden konnte. Dies war für Wellenlängen unterhalb 460 nm nicht mehr möglich. In Abb. 6 sind die Mittelwerte aus 5 Einzelmessungen und die dazugehörigen Standardabweichungen der Mittelwerte eingezeichnet.

Abb. 7 zeigt die Spektralwertfunktionen $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ der Versuchsperson im Vergleich zu den Spektralwertfunktionen des Farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931. Ein weiterer Vergleich zwischen den Daten der Versuchsperson und den Daten des Normalbeobachters ist in Abb. 8 anhand der Funktionen der Spektralwertanteile $b(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $r(\lambda)$ aufgezeigt.

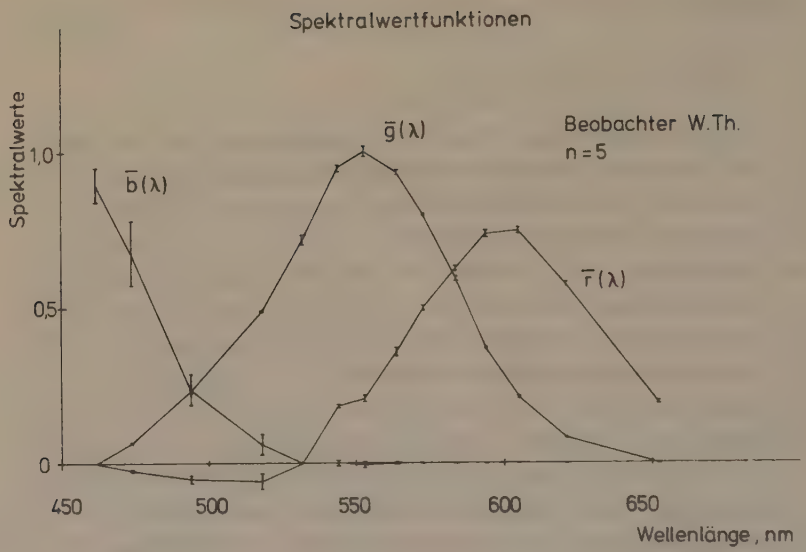


Abb. 6: Spektralwertfunktionen $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ für die Versuchsperson; mit Standardabweichung; Maximum auf 1,0 normiert

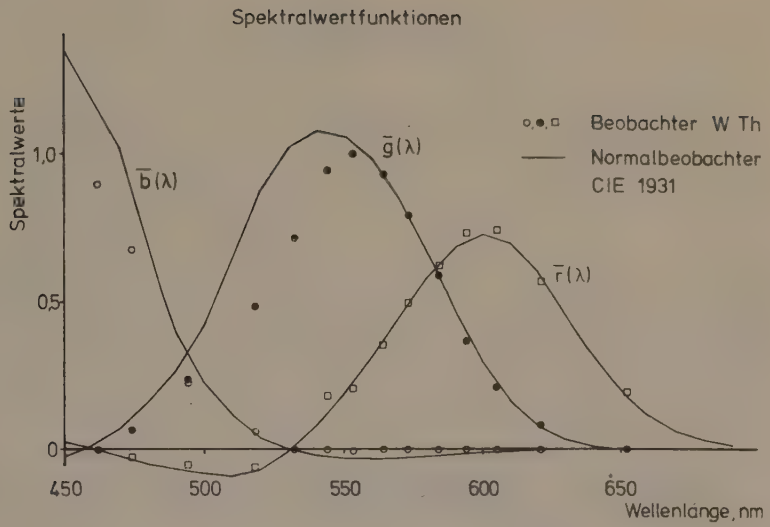


Abb. 7: Spektralwertfunktionen $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ der Versuchsperson und des Farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931

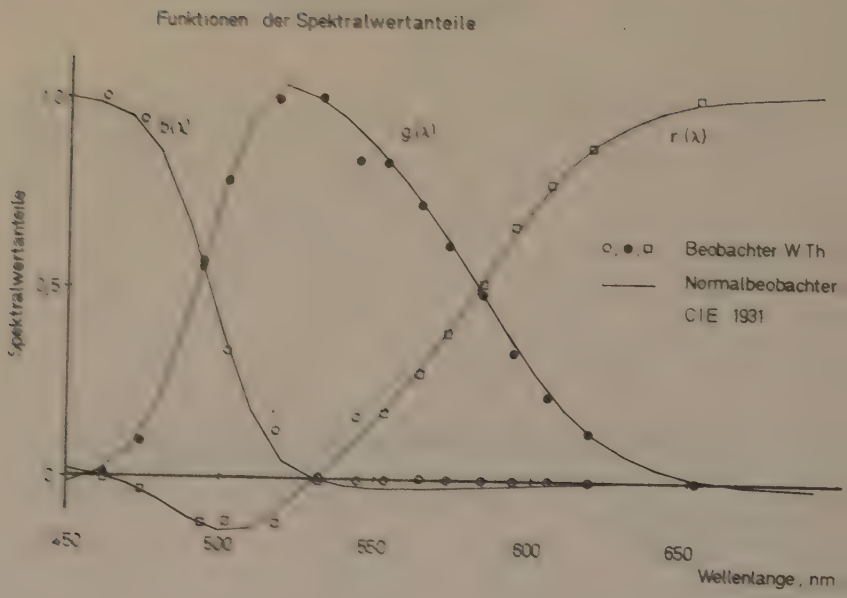


Abb. 5: Funktionen der Spektralwertanteile $b(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $r(\lambda)$ für die Versuchsperson und für den Farbmetrischen Normalbeobachter CIE 1931

5.2. Hellempfindlichkeitsfunktion

In Abb. 9 ist die Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$ für die Versuchsperson dargestellt. Die Messungen wurden unter Anwendung des MDB-Kriteriums durchgeführt. Für jede gemessene Wellenlänge wurden 25 Einzelabgleiche vorgenommen. Es sind jeweils die Mittelwerte mit dazugehörigen Standardabweichungen eingetragen.

Zum Vergleich sind in Abb. 10 die Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ des Farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931 und die Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$ der Abb. 9 überlagert gezeichnet.

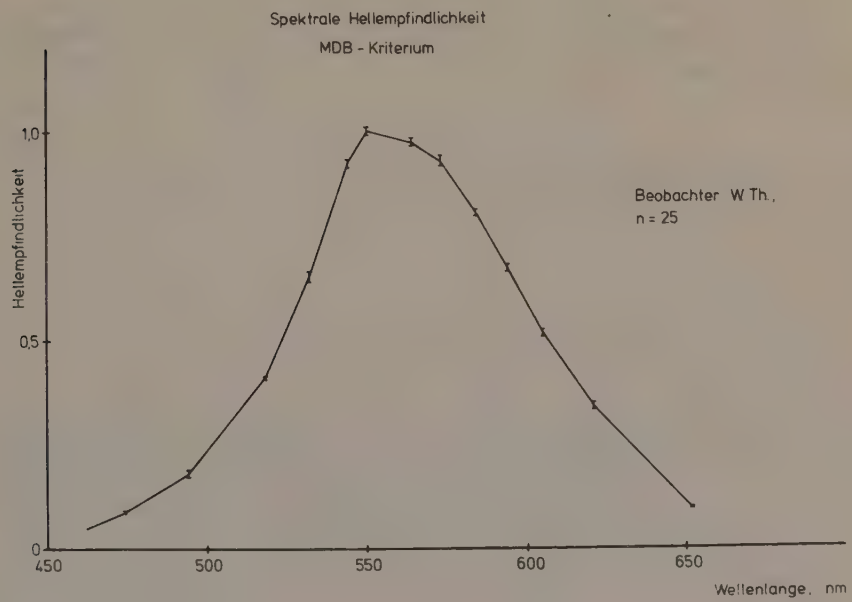


Abb. 9: Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$, gemessen für die Versuchsperson unter Verwendung des MDB-Kriteriums; mit Standardabweichung; Maximum auf 1,0 normiert

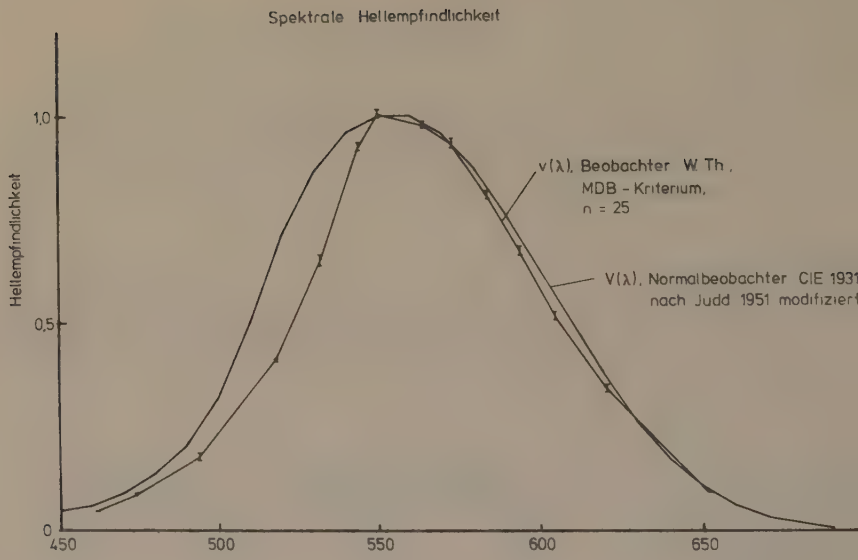


Abb. 10: Hellempfindlichkeitsfunktion v(λ), gemessen für die Versuchsperson unter Verwendung des MDB-Kriteriums; zum Vergleich die Hellempfindlichkeitsfunktion des Normalbeobachters CIE 1931, modifiziert nach JUDD 1951; Maximum auf 1,0 normiert

.3. Heterochrome Helligkeitsabgleiche nach dem MDB- und dem DV-Kriterium; Leuchtdichtebeiwerte

.3.1. Farbwerte des Testreizes $\vec{C}_o$

In Tab. 1 sind die Ergebnisse des isochromen Abgleichs des Testreizes $\vec{C}_o$ angegeben. $\vec{C}_o$ war im linken Photometerhalbfeld vorgegeben und wurde mit Hilfe des rechten Halbfeldes vollständig isochrom nachgemischt. Die Farbvalenz $\vec{C}_o$ wurde realisiert durch einen gelben Farbfilter, welcher in den Probenstrahlengang eingesetzt wurde. Der Testreiz $\vec{C}_o$ wurde bei der BSM-Einstellung H_o = 80 fünf mal gemessen. Aufgeführt sind die Mittelwerte der Farbwerte im (D,E,F)-System und im (B,G,R)-System und die Farbwertanteile b, g und r. Die Standardabweichungen der Mittelwerte sind in Klammern angegeben.

Tab. 1: Isochromer Abgleich des Testreizes $\vec{C}_o$ (n = 5), Farbwerte und Farbwertanteile, Helligkeitseinstellung H_o = 80; Standardabweichungen in Klammern

	D_o	E_o	F_o	B_o	G_o	R_o	b_o	g_o	r_o
$\vec{C}_o$	0,000 (0,000)	48,640 (0,129)	56,520 (0,322)	0,000 (0,000)	48,640 (0,129)	48,475 (1,001)	0,000 (0,000)	0,501 (0,005)	0,499 (0,005)

5.3.2. Ergebnisse des Abgleichs der einzelnen Primärvalenzen

Tab. 2 gibt die Ergebnisse der Helligkeitsabgleiche der einzelnen Primärvalenzen mit dem Testreiz $\vec{C}_0$ (vgl. Abb. 11) wieder. Die erste Spalte der Tab. 2 gibt den Farbwert an, bei dem die jeweilige Primärvalenz abgeglichen wurde; in der zweiten und dritten Spalte sind die Einstellungen an der BSM-Vorrichtung aufgeführt, die benötigt wurden, um zwischen $\vec{C}_0$ und den Primärvalenzen das MDB- und DV-Kriterium zu erfüllen. Es sind die Mittelwerte aus je 5 Einzelmessungen angegeben. In Klammern sind die dazugehörigen Standardabweichungen der Mittelwerte und der Variationskoeffizient (15) aufgeführt.

Tab. 2: Heterochrome Helligkeitsabgleiche (n = 5) zwischen dem Testreiz $\vec{C}_0$ und den instrumentellen Primärvalenzen; H stellt die Helligkeitseinstellung von $\vec{C}_0$ an der BSM-Vorrichtung dar; Standardabweichung und Variationskoeffizient in Klammern

Farbwerte	H (MDB)	H (DV)
D = 90,000	4,280 (0,153=3,6%)	9,960 (0,544=5.5%)
E = 35,000	39,420 (0,451=1.1%)	55,900 (2.027=3,6%)
F = 55,000	28,940 (1,289=4,5%)	50,300 (2,801=5.6%)

Dividiert man die Helligkeitseinstellungen H (MDB) und H (DV) durch die Farbwerte D, E und F der Primärvalenzen, so resultieren relative, auf das instrumentelle Primärvalenzsystem bezogene Leuchtdichtebeiwerte, die im folgenden als l_D, l_E und l_F bezeichnet werden sollen. Ihre Gleichungen lauten

$$(45) \qquad l_D = \frac{H_D}{D}; \qquad l_E = \frac{H_E}{E}; \qquad l_F = \frac{H_F}{F}.$$

Wie Gleichungssytem (18a) zeigt, unterscheiden sie sich von den nicht normierten instrumentellen Leuchtdichtebeiwerten δ', ε' und φ' nur durch einen gemeinsamen konstanten Faktor C. Im Gegensatz zu diesen führt ihre Anwendung auf die Farbwerte D, E und F einer Farbvalenz $\vec{F} = D\cdot\vec{D} + E\cdot\vec{E} + F\cdot\vec{F}$ nicht auf die Leuchtdichte L (in cd/m^2) dieser Farbvalenz, sondern auf die Helligkeitseinstellung H an der BSM-Vorrichtung, bei welcher die Farbvalenz $\vec{F}$ gemessen wurde. Es gilt also:

$$(46) \qquad L = D\cdot\delta' + E\cdot\varepsilon' + F\cdot\varphi';$$

$$(47) \qquad H = D\cdot l_D + E\cdot l_E + F\cdot l_F.$$

Die Leuchtdichtebeiwerte l_D, l_E und l_F, wie sie sich gemäß Gl. 45 aus den Abgleichen nach dem MDB- und nach dem DV-Kriterium (Tab. 2) berechnen lassen, sind in Tab. 3 aufgeführt. Die Standardabweichungen sind in Klammern angegeben.

Tab. 3: Relative Leuchtdichtebeiwerte l_D, l_E und l_F des instrumentellen Primärvalenzsystems; die Anwendung von l_D, l_E und l_F auf die Farbwerte D, E und F führt zu Helligkeitswert H an der BSM-Vorrichtung; Standardabweichung in Klammern

	MDB	DV
l_D	0,048 (0,002)	0,111 (0,006)
l_E	1,126 (0,013)	1,597 (0,058)
l_F	0,526 (0,023)	0,915 (0,051)

Mit Hilfe der Leuchtdichtebeiwerte l_D, l_E und l_F läßt sich die Additivität der durchgeführten Helligkeitsabgleiche überprüfen. Dazu werden l_D, l_E und l_F gemäß Gl. (47) auf die Farbwerte D_o, E_o und F_o des Testreizes $\vec{C}_o$ (Tab. 1) angewandt. Es werden zum einen die Werte für das MDB-Kriterium und zum anderen die Werte für das DV-Kriterium aus Tab. 3 eingesetzt. Die Gleichung (47) lautet dann

$$(48) \quad H = l_D \cdot D_o + l_E \cdot E_o + l_F \cdot F_o.$$

Für das MDB-Kriterium erhält man hiernach:

$$H_{MDB} = 0{,}048 \cdot 0 + 1{,}126 \cdot 48{,}640 + 0{,}526 \cdot 56{,}520;$$

$$\boxed{H_{MDB} = 84{,}498\ (1{,}463)}$$

Für das DV-Kriterium erhält man

$$H_{DV} = 0{,}111 \cdot 0 + 1{,}597 \cdot 48{,}640 + 0{,}915 \cdot 56{,}520;$$

$$\boxed{H_{DV} = 129{,}394\ (4{,}049)}$$

Die Standardabweichung (in Klammern) wurde nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet.

Die Anwendung des STUDENT-t-Tests ((39), S. 192 ff.) zur Überprüfung einer signifikanten Abweichung der Werte H_{MDB} und H_{DV} vom Sollwert $H_o = 80$ (bei diesem Helligkeitswert wurden die Farbwerte von $\vec{C}_o$ gemessen, vgl. Tab. 1) ergab für das MDB-Kriterium

$$t_{MDB} = 3{,}072\ ;$$

und für das DV-Kriterium

$$t_{DV} = 12{,}199.$$

Bei FG = 16 Freiheitsgraden und Verwendung des zweiseitigen Tests erweist sich die Abweichung des Wertes H_{DV} für das DV-Kriterium als hochsignifikant ($p < 0{,}005$), während sich die Abweichung des H_{MDB}-Wertes bei gleicher Irrtumswahrscheinlichkeit als nicht-signifikanter Unterschied darstellt, also als zufallsbedingt anzusehen ist.

Zur Ermittlung der Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ müssen die Umrechnungsfaktoren k_1 und k_2 berücksichtigt werden (vgl. 4.3.2.).

Die Messungen zur Bestimmung der Umrechnungsfaktoren k_1 und k_2 ergab folgende Werte (n = 5):

$$D_{494} = 38{,}620\ (2{,}842);$$

$$E_{494} = 14{,}180\ (0{,}156);$$

$$F_{583} = 33{,}020\ (0{,}490);$$

$$E_{583} = 28{,}320\ (0{,}373).$$

In Klammern sind wiederum die Standardabweichungen der Mittelwerte aus 5 Messungen aufgeführt. Nach Gl.(11b) und (13) ergeben sich folgende Transformationsgleichungen:

$$B = 0{,}367 \cdot D;$$

$$G = 1{,}000 \cdot E;$$

$$R = 0{,}858 \cdot F.$$

Mit $k_1 = 0{,}367$ und $k_2 = 0{,}858$ lassen sich die Leuchtdichtebeiwerte für das WRIGHTsche (B,G,R)-System entsprechend Gl. (21), 4.4.1.2. berechnen. Sie sind in Tab. 4 mit den zugehörigen Standardabweichungen für beide Helligkeitskriterien aufgeführt.

Tab. 4: Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ϱ, berechnet aus dem direkten Helligkeitsabgleich der instrumentellen Primärvalenzen mit dem Testreiz $\vec{C}_o$

	MDB	DV
β	0,115 (0,010)	0,189 (0,019)
γ	1,000	1,000
ϱ	0,545 (0,027)	0,668 (0,046)

5.3.3. Ergebnisse der Bestimmung leuchtdichtefreier Quervektoren

Tab.5 enthält die Farbwerte und Farbwertanteile der konstanten Vergleichsreize $\vec{C}_i$ (i = 1,2 ... 6). Sie besitzen keine Streuung, da die Reize im rechten Photometerhalbfeld vorgegeben wurden und so nicht nachgemischt zu werden brauchten. Die Farbörter der Vergleichsreize $\vec{C}_i$ (i = 1,2 ... 6) und des Testreizes $\vec{C}_o$ sind in Abb. 11 in der gr-Farbtafel dargestellt.

Für den Vergleichsreiz $\vec{C}_i$ wurde die Helligkeit von $\vec{C}_o$ bestimmt, die benötigt wurde, um mit dem Vergleichsreiz das Kriterium der Gleichhelligkeit zu erfüllen. Der Abgleich wurde für jeden Vergleichsreiz $\vec{C}_i$ fünf mal durchgeführt. Tab. 6 gibt - getrennt für das MDB- und das DV-Kriterium - die Mittelwerte dieser Abgleiche mit dazugehörigen Standardabweichungen wieder.

Tab. 5: Konstant vorgegebene Vergleichsreize $\vec{C}_i$ (i = 1,2 ...6), Farbwerte und Farbwertanteile

$\vec{C}_i$	D	E	F	B	G	R	b	g	r
$\vec{C}_1$	23,4	30,0	5,0	8,588	30,000	4,290	0,200	0,700	0,100
$\vec{C}_2$	76,3	35,0	8,2	28,002	35,000	7,036	0,400	0,500	0,100
$\vec{C}_3$	89,9	18,0	10,5	32,993	18,000	9,009	0,550	0,300	0,150
$\vec{C}_4$	84,9	8,5	19,8	31,158	8,500	16,988	0,550	0,150	0,300
$\vec{C}_5$	92,7	8,5	49,6	34,021	8,500	42,557	0,400	0,100	0,500
$\vec{C}_6$	49,1	9,0	73,4	18,020	9,000	62,977	0,200	0,100	0,700

Tab. 6: Heterochrome Helligkeitsabgleiche (n =5) zwischen dem Testreiz $\vec{C}_o$ und den Vergleichsreizen $\vec{C}_i$ (i = 1,2 ... 6); Standardabweichung von H_i und Variationskoeffizient in Klammern

$\vec{C}_i$	Helligkeit H_i des Testreizes $\vec{C}_o$	
	MDB	DV
$\vec{C}_1$	34,700 (0,406 = 1,2 %)	44,960 (2,454 ≙ 5,5 %)
$\vec{C}_2$	44,520 (0,367 ≙ 0,8 %)	63,680 (0,942 ≙ 1,5 %)
$\vec{C}_3$	29,000 (0,341 ≙ 1,2 %)	43,800 (0,825 ≙ 1,9 %)
$\vec{C}_4$	23,380 (0,146 ≙ 0,6 %)	32,140 (1,544 ≙ 4,8 %)
$\vec{C}_5$	36,620 (0,584 ≙ 1,6 %)	66,840 (2,193 ≙ 3,3 %)
$\vec{C}_6$	47,880 (0,499 ≙ 1,0 %)	69,160 (1,356 ≙ 2,0 %)

In Tab. 7 und Tab. 8 sind die Farbwerte und Farbwertanteile der leuchtdichtefreien Quervektoren $\vec{D}_i$ (MDB) und $\vec{Q}_i$ (DV) (i = 1,2 ...6) mit Standardabweichung (in Klammern) aufgeführt.

Tab. 7: Leuchtdichtefreie Quervektoren $\vec{D}_i$ (i = 1,2 ...6), Farbwerte und Farbwertanteile, MDB-Kriterium; Standardabweichung in Klammern

$\vec{D}_i$	B	G	R	b	g	r
$\vec{D}_1$	- 8,592 (0,639)	- 8,902 (0,235)	16,738 (0,430)	11,359	11,770 (6,696)	- 22,129 (24,037)
$\vec{D}_2$	- 28,015 (2,084)	- 7,932 (0,234)	19,944 (0,479)	1,751	0,496 (0,015)	- 1,246 (0,177)
$\vec{D}_3$	- 33,008 (2,456)	- 0,368 (0,213)	8,567 (0,286)	1,330	0,015 (0,000)	- 0,345 (0,038)
$\vec{D}_4$	- 31,173 (2,319)	5,715 (0,096)	- 2,815 (0,132)	1,103	- 0,202 (0,001)	0,100 (0,009)
$\vec{D}_5$	- 34,036 (2,533)	13,765 (0,360)	-20,351 (0,552)	0,838	- 0,339 (0,005)	0,501 (0,032)
$\vec{D}_6$	- 18,028 (1,341)	20,111 (0,313)	-33,940 (0,756)	0,566	- 0,631 (0,015)	1,065 (0,046)

Tab. 8: Leuchtdichtefreie Differenzvektoren $\vec{Q}_i$ (i = 1,2 ...6), Farbwerte und Farbwertanteile, DV-Kriterium, Standardabweichung in Klammern

$\vec{Q}_i$	B	G	R	b	g	r
$\vec{Q}_1$	- 8,592 (0,639)	- 2,664 (1,494)	22,955 (1,563)	- 0,734	- 0,228 (0,030)	1,962 (0,301)
$\vec{Q}_2$	-28,015 (2,084)	3,717 (0,582)	31,553 (0,875)	- 3,861	0,512 (0,062)	4,349 (1,358)
$\vec{Q}_3$	-33,008 (2,456)	8,630 (0,507)	17,535 (0,628)	4,823	- 1,261 (0,116)	-2,562 (0,994)
$\vec{Q}_4$	-31,173 (2,319)	11,041 (0,940)	2,493 (0,943)	1,767	- 0,626 (0,033)	-0,141 (0,064)
$\vec{Q}_5$	-34,036 (2,533)	32,139 (1,338)	- 2,039 (1,349)	8,646	- 8,164 (2,798)	0,518 (0,411)
$\vec{Q}_6$	-18,028 (1,341)	33,049 (0,832)	-21,046 (0,952)	2,993	- 5,486 (0,867)	3,493 (0,997)

Die Farbörter der Quervektoren $\vec{D}_i$ und $\vec{Q}_i$ sind in Abb. 11 und Abb. 12 dargestellt. Die Standardabweichung der Farbwertanteile ist in Form von senkrecht und waagerecht eingezeichneten Strecken eingetragen. Wie in Abb. 11 zu sehen ist, liegen die Farbörter der Quervektoren $\vec{D}_i$, welche nach dem MDB-Kriterium bestimmt werden, nahezu auf der eingezeichneten Alychnenspur. Sie lassen sich annähernd bestimmen als Schnittpunkte der Verbindungsgeraden zwischen den Farbörtern von $\vec{C}_o$ und $\vec{C}_i$ und der Alychnenspur. Die Farbörter der Quervektoren $\vec{Q}_i$, welche nach dem DV-Kriterium bestimmt wurden, liegen dagegen in der Farbtafelebene weit verstreut (Abb. 12).

In Tab. 9 sind schließlich die berechneten Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ getrennt für beide Kriterien aufgeführt. Wie in 4.4.2. bereits beschrieben, lassen sich aus den Meßdaten insgesamt 15 verschiedene Tripel von Leuchtdichtebeiwerten für jedes Kriterium berechnen. In Klammern sind die

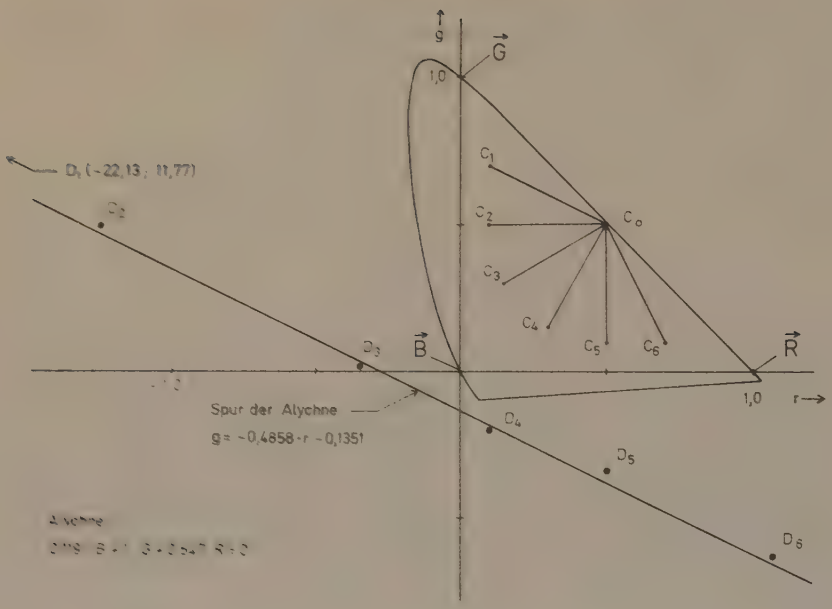


Abb. 11: gr-Farbtafel mit den Farbörtern der Vergleichsreize $\vec{C}_i$ ($i = 1,2 \ldots 6$) und des Testreizes $\vec{C}_o$. Zusätzlich sind die Farbörter der nach dem MDB-Kriterium ermittelten leuchtdichtefreien Differenzvektoren $\vec{D}_i$ ($i = 1,2, \ldots 6$) mit Standardabweichung eingezeichnet.

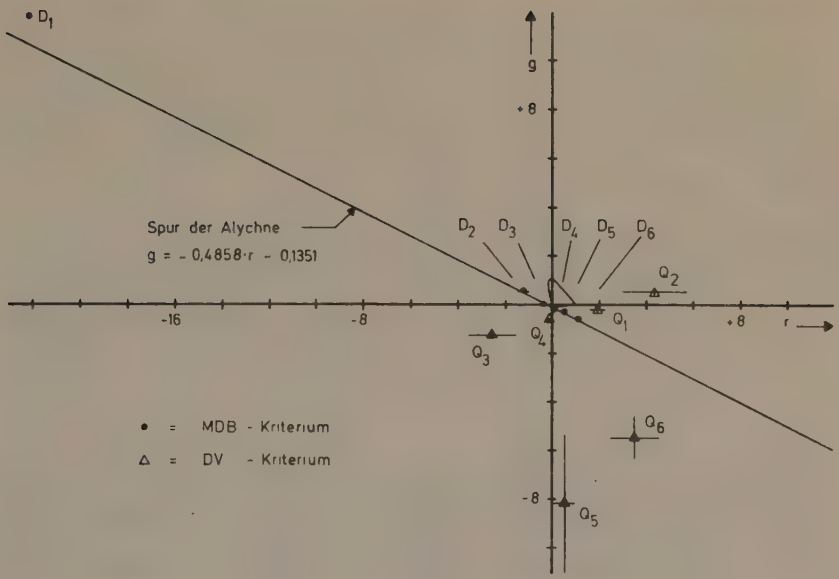


Abb. 12: gr-Farbtafel mit den Farbörtern und Stabdardabweichungen der leuchtdichtefreien Differenzvektoren $\vec{D}_i$ (MDB) und $\vec{Q}_i$ (DV) (i = 1,2 ...6)
○ = Abgleichkriterium MDB
▲ = Abgleichkriterium DV

Standardabweichungen angegeben, welche aus den Originaldaten entsprechend Gleichung (40) und (41) berechnet wurden. Weiterhin ist für jeden Leuchtdichtebeiwert der gewogene Mittelwert angegeben, welcher aus jeweils allen $\binom{6}{2} = 15$ Werten unter Berücksichtigung der Standardabweichungen berechnet wurde (vgl. (90), S. 41).

Tab. 9: Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ς, berechnet aus der Kombination von jeweils zwei leuchtdichtefreien Quervektoren ($\vec{D}_i/\vec{D}_j$ und $\vec{Q}_i/\vec{Q}_j$); Standardabweichung in Klammern; unten: gewogener Mittelwert

	MDB			DV		
i/j	β	γ	ς	β	γ	ς
1/2	0,151 (0,037)	1,000	0,609 (0,038)	0,455 (0,152)	1,000	0,287 (0,122)
1/3	0,146 (0,017)	1,000	0,607 (0,027)	0,403 (0,062)	1,000	0,267 (0,087)
1/4	0,129 (0,010)	1,000	0,598 (0,022)	0,375 (0,043)	1,000	0,256 (0,072)
1/5	0,066 (0,015)	1,000	0,566 (0,017)	0,917 (0,079)	1,000	0,459 (0,081)
1/6	0,058 (0,025)	1,000	0,562 (0,013)	1,181 (0,098)	1,000	0,558 (0,063)
2/3	0,145 (0,024)	1,000	0,601 (0,048)	0,376 (0,069)	1,000	0,216 (0,081)
2/4	0,131 (0,010)	1,000	0,581 (0,024)	0,371 (0,045)	1,000	0,212 (0,052)
2/5	0,091 (0,010)	1,000	0,525 (0,016)	0,903 (0,078)	1,000	0,684 (0,093)
2/6	0,101 (0,013)	1,000	0,539 (0,013)	0,968 (0,061)	1,000	0,741 (0,053)
3/4	0,133 (0,009)	1,000	0,556 (0,047)	0,371 (0,049)	1,000	0,206 (0,116)
3/5	0,115 (0,009)	1,000	0,485 (0,023)	0,875 (0,080)	1,000	1,155 (0,192)
3/6	0,125 (0,011)	1,000	0,526 (0,015)	0,753 (0,050)	1,000	0,925 (0,063)

i/j	MDB			DV		
	β	γ	δ	β	γ	δ
4/5	0,144 (0,014)	1,000	0,436 (0,040)	0,692 (0,119)	1,000	4,218 (1,630)
4/6	0,136 (0,011)	1,000	0,520 (0,018)	0,449 (0,054)	1,000	1,186 (0,082)
5/6	0,073 (0,026)	1,000	0,554 (0,026)	0,896 (0,088)	1,000	0,803 (0,112)
gew. Mittelw.	0,119	1,000	0,547	0,579	1,000	0,544

Die gewichteten Mittelwerte (Tab. 9, letzte Zeile) werden später (vgl. 5.5.1., Gl. (50)) weiterverwendet.

5.3.4. Vergleich der beiden Methoden und Kriterien nach Anwendung der Leuchtdichtebeiwerte auf die Spektralfunktionen; Vergleich mit der gemessenen Hellempfindlichkeitsfunktion

Zur Überprüfung der Additivität habe ich die Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ, welche nach dem MDB- und dem DV-Kriterium bestimmt worden waren (vgl. 5.3.2. und 5.3.3.), gemäß dem ABNEYschen Gesetz (vgl. 2.2.) auf die experimentell gemessenen Spektralwertfunktionen (vgl. 5.1.) angewandt. Damit lassen sich für die ermittelten Leuchtdichtebeiwert-Tripel die Hellempfindlichkeitsfunktionen $v(\lambda) = \beta \cdot \bar{b}(\lambda) + \gamma \cdot \bar{g}(\lambda) + \varrho \cdot \bar{r}(\lambda)$ errechnen. Diese Funktionen sollen jeweils mit der Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$ erglichen werden, welche für die Versuchsperson unter Verwendung des MDB-Kriteriums direkt gemessen wurde (vgl. 5.2.). In Abb. 13-16 sind die Überlagerungen der errechneten Funktionen mit der nach dem MDB-Kriterium bestimmten Funktion dargestellt. Für die Methode der leuchtdichtefreien Quervektoren sind alle nach dem ABNEYschen Gesetz errechneten Hellempfindlichkeitsfunktionen in je einer Abbildung zusammengefaßt (MDB = Abb. 15; DV = Abb. 16). In jeder Abbildung ist rechts oben die Korrelation zwischen den errechneten Funktionen und der gemessenen Funktion dargestellt und der Korrelationskoeffizient r angegeben (61).

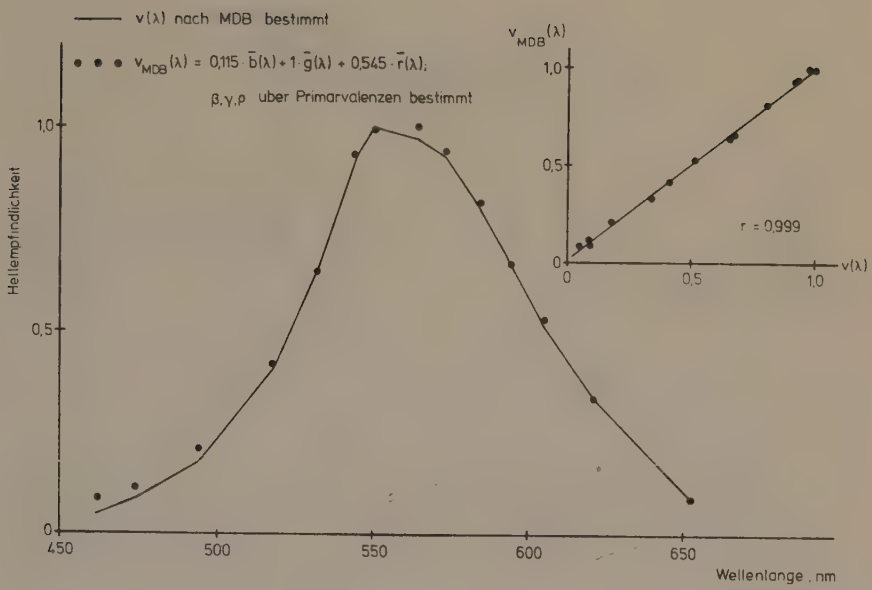


Abb. 13: Vergleich der mit Hilfe der Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ berechneten Hellempfindlichkeitsfunktionen und der unter Verwendung des MDB-Kriteriums gemessenen Hellempfindlichkeitsfunktion v(λ); rechts oben: Korrelation der errechneten Funktion mit der gemessenen Funktion

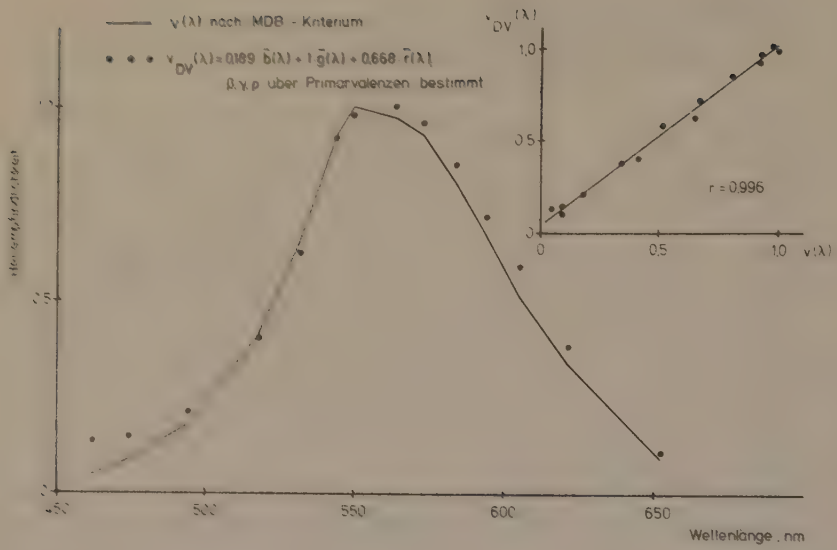


Abb. 14: siehe Abb. 13

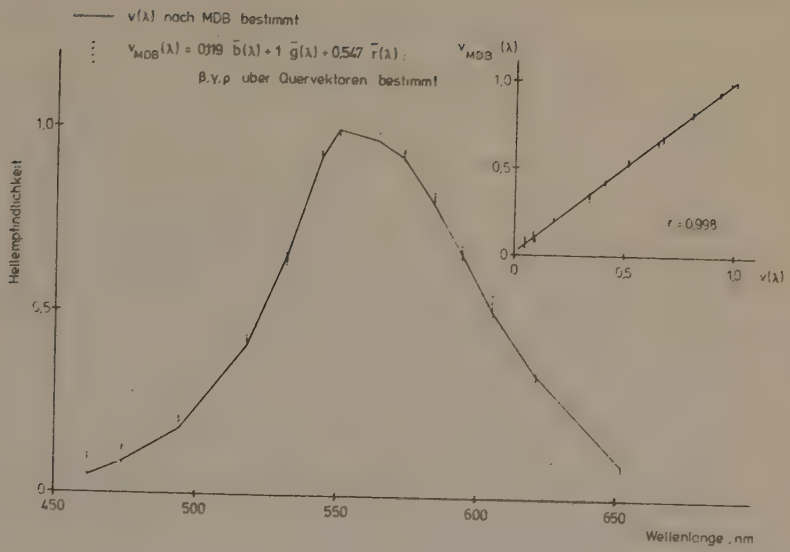


Abb. 15: siehe Abb. 13

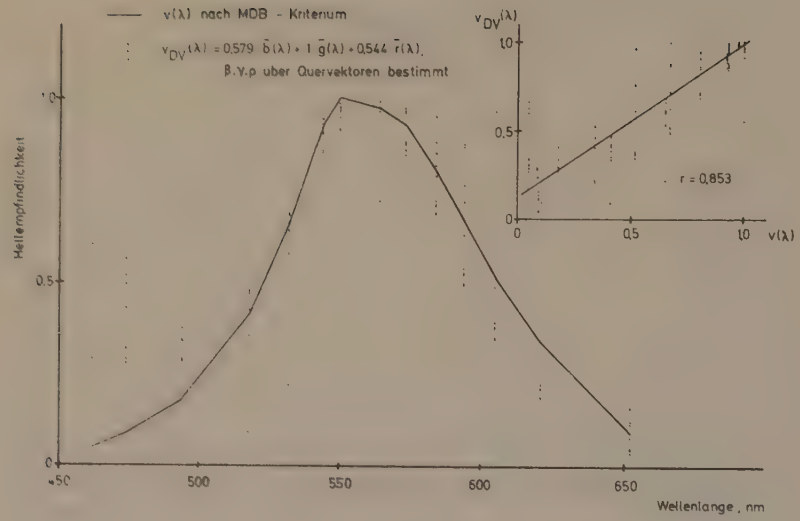


Abb. 16: siehe Abb. 13

5.4. Einfluß von Erregungsunterschieden im blau-gelben Übertragungskanal auf die Trennliniendeutlichkeit

Mit dem angegebenen Verfahren (vgl. 4.5.) konnte zwischen den Testreizen $\vec{T}_i$ (i = 1,2,3,4) und den Vergleichsreizen immer eine Einstellung gefunden werden, bei der die Trennliniendeutlichkeit ganz besonders gering wurde. Im Zustand eines solchen Abgleichs verschwand die Trennlinie jedoch nicht vollständig, sondern blieb noch als feine Linie erkennbar. Ihre Deutlichkeit nahm mit dem Farbabstand der Vergleichsreize zum Testreiz leicht zu. Auffällig war bei diesen Vergleichen, daß die Trennlinie wesentlich stärker verschwamm als bei den übrigen MDB-Abgleichen, bei welchen der Farbton des Vergleichsfeldes nicht variiert werden konnte (vgl. 4.4.1., 4.4.2. und 4.7.) (Abb. 17).

Die Farbwertanteile der abgeglichenen Vergleichsreize sind zusammen mit den isochromen Messungen der Testreize ($\vec{T}_1$ = VG4; $\vec{T}_2$ = OG 530; $\vec{T}_3$ = OG 570; $\vec{T}_4$ = OG 590) in Tab. 10-13 aufgeführt. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte der Einzelbestimmungen (n = 5).

Tab. 10-13: Farbwertanteile der Testreize $\vec{T}_i$ (i = 1,2,3,4) und der Vergleichsreize (n = 5)

Tab.10:

	b	g	r
VG 4, T_1	0,04	0,65	0,31
Vergleichsreize	0,05	0,65	0,30
	0,13	0,60	0,27
	0,24	0,51	0,25
	0,39	0,41	0,20

Tab. 11

	b	g	n
33 330.$^{-1}$	0,00	0,50	0,50
Vergleichswerte	0,09	0,45	0,46
	0,11	0,37	0,43
	0,33	0,34	0,33
	0,51	0,00	0,21

Tab. 12:

	b	g	n
33 330.$^{-2}$	0,00	0,30	0,70
Vergleichswerte	0,12	0,29	0,59
	0,25	0,23	0,52
	0,41	0,18	0,41
	0,60	0,09	0,31

Tab. 13:

	b	g	n
33 330.$^{-4}$	0,00	0,25	0,82
Vergleichswerte	0,07	0,17	0,76
	0,16	0,16	0,68
	0,30	0,10	0,60
	0,45	0,06	0,47

In Abb. 17 sind die Einzelmessungen der Testreize $\vec{T}_i$ als Punkte innerhalb der Kreise dargestellt; die übrigen Punkte sind die Farbörter der nach dem MDB-Kriterium abgeglichenen Vergleichsreize. "CL" stellt eine der Vergleichsgeraden dar, entlang welcher die Vergleichsreize variiert werden konnten (vgl. 4.5.).

Alle Einzelmessungen eines Testreizes $\vec{T}_i$ und der dazugehörigen Vergleichsreize ergeben zusammen eine Punktmenge P_i $(r_i; g_i)$, für welche jeweils eine Ausgleichsgerade ermittelt wurde. Es wurde die Winkelhalbierende der Regressionsgeraden von g auf r und von r auf g bestimmt. Diese Gerade wurde als Annäherung für die mittlere ausgleichende Funktion verwendet, welche die sogenannte Strukturgleichung beschreibt für den Fall, daß sowohl die Abszissen- als auch die Ordinatenwerte der Punktmengen P_i $(r_i; g_i)$ mit Fehlern behaftet sind (vgl. (90), S. 416 ff.). Die Gerade verläuft durch den jeweiligen Schwerpunkt der Punktmenge P_i, also durch den Schnittpunkt der beiden Regressionsgeraden, und besitzt die Steigerung m, welche sich nach folgender Formel berechnet:

$$m = \tan \frac{\arctan m_{gr} + \arctan m_{rg}}{2};$$

$$\text{mit } m_{gr} = \frac{n \cdot \sum r_i g_i - \sum r_i \cdot \sum g_i}{n \cdot \sum r_i^2 - (\sum r_i)^2}; \quad \text{und}$$

$$m_{rg} = \frac{n \cdot \sum g_i^2 - (\sum g_i)^2}{n \cdot \sum r_i g_i - \sum r_i \cdot \sum g_i} \qquad \text{(vgl. (61)).}$$

Wichtiges Ergebnis:
Die Ausgleichsgeraden konvergieren in der Nähe des tritanopischen Fehlpunktes in einem Punkt.

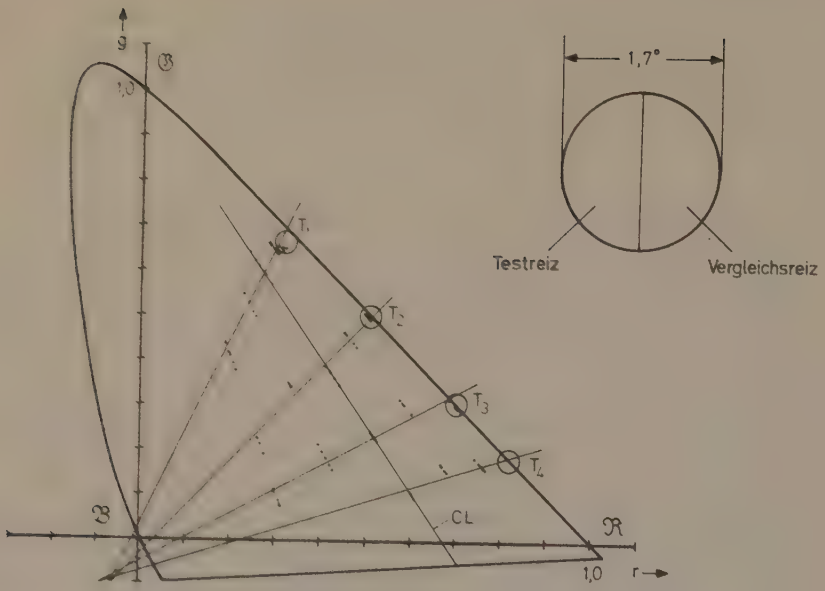


Abb. 17: Testreize $\overrightarrow{T_j}$ (Punkte innerhalb der Kreise) und die nach dem MDB-Kriterium abgeglichenen Vergleichsreize (Punkte) in der WRIGHTschen gr-Farbtafel; "CL" stellt eine der Vergleichsgeraden dar, entlang welcher die Farbart der Vergleichsreize variiert werden konnte; rechts oben: zweigeteiltes Photometergesichtsfeld

Für jede Punktmenge P_i wurde der Korrelationskoeffizient r bestimmt. Dieser stellt ein Maß für das Zutreffen der linearen Beziehung dar, welche durch die ermittelte Ausgleichsgerade festgelegt wird. Seine Gleichung lautet (61):

$$r = \frac{\sum r_i g_i - \frac{1}{n} \cdot (\sum r_i) \cdot (\sum g_i)}{\sqrt{\left[\sum r_i^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum r_i)^2\right] \cdot \left[\sum g_i^2 - \frac{1}{n} (\sum g_i)^2\right]}} \quad .$$

Tab. 14 gibt die Ergebnisse dieser Berechnung wieder.

Tab. 14:

Testreiz (T_i)	Korr.koeff. r .	n
VG 4 (T_1)	0,892	37
OG 530 (T_2)	0,945	25
OG 570 (T_3)	0,945	30
OG 590 (T_4)	0,926	25

5.5. Zusammenhang zwischen tritanopischer Sättigungsfunktion und spektraler Distinktibilität

5.5.1. Aufstellung der tritanopischen Sättigungsfunktion

Zur Aufstellung der gesuchten tritanopischen Sättigungsfunktion sei zunächst der Übergang von einem Dreifarbensystem zu einem Gegenfarbensystem beschrieben. SCHRÖDINGER (70) hat das Prinzip bereits gezeigt, welches darin besteht, die Primärvalenzen so zu wählen, daß zwei in der Alychne liegen und reine Farbinformation tragen, während die dritte die gesamte Leuchtdichte trägt. Das Prinzip beruht also auf einer additiven Zerlegung der Farbe, farbmetrisch ausgedrückt in Chrominanz und Luminanz (63) oder, empfindungsgemäß ausgedrückt in Buntheit und Helligkeit, wobei die zweidimensionale Buntheit wiederum in die beiden Komponenten Grün-Rot und Blau-Gelb aufgespalten ist. Den drei Spektralwertfunktionen entsprechen dann zwei Buntempfindlichkeiten und eine Hellempfindlichkeit (68).

Wir betrachten zunächst das Farbdreieck B-G-R in Abb. 18. Die Eckpunkte stellen die Bezugsfarben oder instrumentellen Primärvalenzen des verwendeten farbmetrischen Meßsystems dar. Zu den Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$ und $\vec{R}$ gehören die Spektralwertfunktionen $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ (Abb. 19, oben). Diese Kurven geben die Beiträge der jeweiligen Primärvalenz an, die man aufwenden muß, um ein äquienergetisches Spektrum nachzumischen. Die dargestellten Kurven sind die des Farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931, nach JUDD 1951 (43) modifiziert und in das WRIGHTsche (B,G,R)-System transformiert.

Das Gegenfarbensystem sei durch die Primärvalenzen $\vec{M}$, $\vec{N}$ und $\vec{S}$ beschrieben (Abb. 18). $\vec{M}$ und $\vec{S}$ tragen die chromatische Information ohne Helligkeit, $\vec{N}$ trägt die achromatische Hel-

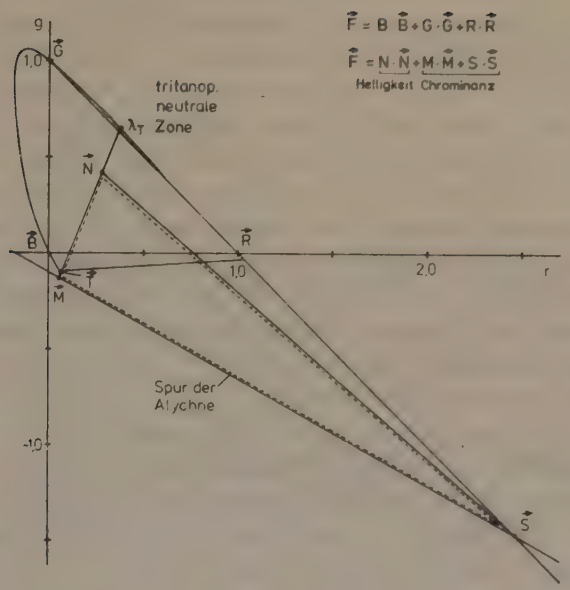


Abb. 18: Einbettung des Gegenfarbensystems (M,N,S) in das WRIGHTsche (B,G,R)-System. Die Primärvalenz $\vec{N}$ trägt die Luminanz und keine Farbinformation, die Primärvalenzen $\vec{M}$ und $\vec{S}$ tragen keine Helligkeit, sondern reine Farbinformation (Chrominanz). $\vec{T}$ ist der tritanopische Fehlpunkt; λ_T ist die Wellenlänge der tritanopischen neutralen Zone.

ligkeit, d.h. $\vec{M}$ und $\vec{S}$ tragen zusammen die Chrominanz, $\vec{N}$ trägt die Luminanz (vgl. (64) u. (65)). In Abb. 20 ist der Farbenraum dargestellt, aufgespannt durch die Primärvalenzen $\vec{M}$, $\vec{N}$ und $\vec{S}$ des Gegenfarbensystem. Transformiert man die Spektralwerte nach dem üblichen Verfahren in das Gegenfarbensystem, so erhält man die Gegenfarben-Spektralwerte $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{n}(\lambda)$ und $\bar{s}(\lambda)$ (Abb. 19, mitte). Die Funktion $\bar{m}(\lambda)$ beschreibt die blau-gelbe Buntempfindlichkeit, wobei die Blauheit mit positivem und die Gelbheit mit negativem Vorzeichen auftritt; die Funktion $\bar{s}(\lambda)$ beschreibt die grün-rote Buntempfindlichkeit, wobei die Grünheit mit negativem und die Rotheit mit positivem Vorzeichen auftritt. $\bar{n}(\lambda)$ ist die photopische spektrale Hellempfindlichkeit.

Buntsättigung kann definiert werden als Chrominanz bezogen auf Luminanz, bzw. Buntheit bezogen auf Helligkeit (vgl. (82) u. (83)). Da Chrominanz eine zweidimensionale Größe ist, gibt es zwei spektrale Sättigungsfunktionen. Sie werden im folgenden als $p(\lambda)$ und $q(\lambda)$ bezeichnet. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 20 die Sättigungsgrößen p und q an einem Beispiel eingezeichnet. Man kann sie als gewöhnliche inhomogene projektive Koordinaten mit folgenden Gleichungen auffassen

$$p = \frac{M}{N} ;$$

$$q = \frac{S}{N} ;$$

$$1 \equiv \frac{N}{N} .$$

Diese Größen kennzeichnen - genau wie die Farbwertanteile, die die sogenannte "Farbart" beschreiben, - die Farben unabhängig von ihrer nichtselektiven Strahlungsintensitätsvariation. Aufgrund der Lokalisation von $\vec{N}$ in Unbunt beschreiben

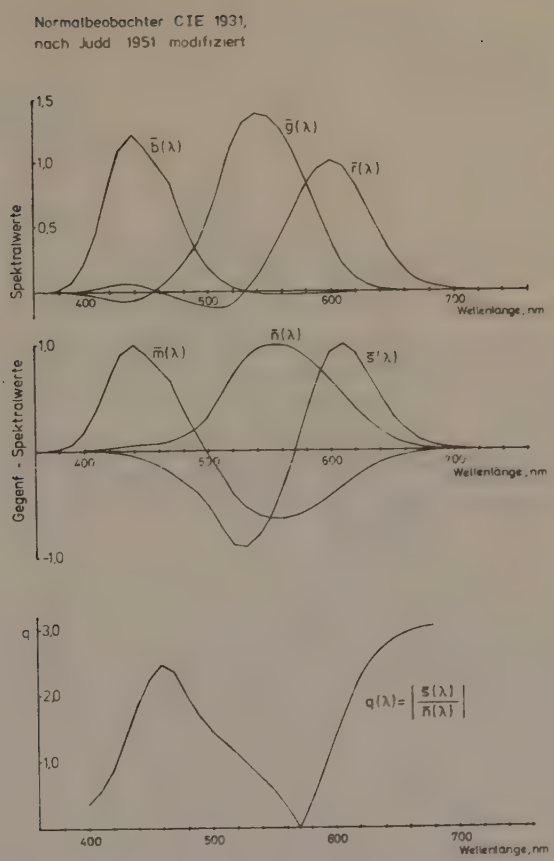


Abb. 19: oben: Spektralwertfunktionen des Farbmetrischen Normalbeobachters

mitte: Gegenfarben-Spektralwertfunktionen

unten: tritanopische Sättigungsfunktion

(M,N,S) - Gegenfarbensystem

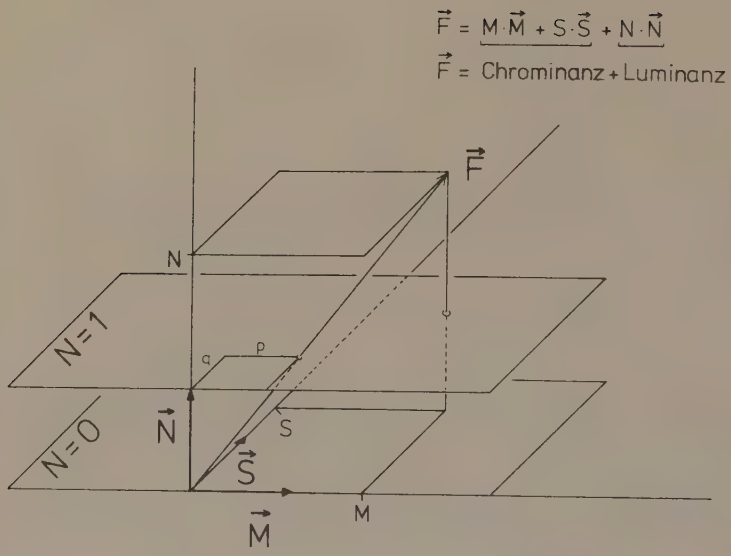


Abb. 20: Farbenraum des (M,N,S)-Gegenfarbensystems; $\vec{N}$ trägt die Luminanz und keine Farbinformation, $\vec{M}$ und $\vec{S}$ tragen die Chrominanz aber keine Helligkeitsinformation; die Ebene N = 0 stellt die Alychne dar. Für alle Farbvalenzvektoren, die in der Ebene N = 1 enden, kann M mit p und S mit q identifiziert werden. p und q stellen Sättigungsgrößen dar.

p und q gemeinsam die Buntsättigung.

Im vorliegenden Fall interessiert nur die rot-grüne Sättigungsfunktion, also der Quotient aus $\bar{s}(\lambda)$ und $\bar{n}(\lambda)$, und zwar dem Betrage nach

$$q(\lambda) = \left| \frac{\bar{s}(\lambda)}{\bar{n}(\lambda)} \right| .$$

Die Funktion $\bar{s}(\lambda)$ und nicht $\bar{m}(\lambda)$ wird herangezogen, weil sich zwischen Farben in der blau-gelben Richtung keine starke Trennliniendeutlichkeit ausbildet. Die Funktion $q(\lambda)$, wie sie aus dem Farbmetrischen Normalbeobachter folgt, ist in Abb. 19 unten gezeigt. Diese Funktion ist die gesuchte tritanopische Sättigungsfunktion. Weil die Funktion $\bar{s}(\lambda)$ der spektralen Buntempfindlichkeit eines Tritanopen entspricht, nennen wir sie auch tritanopische Buntsättigungsfunktion.

Zur Aufstellung einer solchen, aber individuellen Sättigungsfunktion $q(\lambda)$ wird zunächst das Gleichungssystem gesucht, das die vektorielle Einbettung des gesamten Gegenfarbensystems in das (B,G,R)-System beschreibt. Dazu werden aus der Literatur die Wellenlänge λ_T der tritanopischen neutralen Zone (λ_T = 570 nm; vgl. (91), S.333 f.) und die Normfarbwertanteile x_T, y_T und z_T des tritanopischen Fehlpunktes $\vec{T}$ (86) entnommen:

$x_{\lambda_T} = 0{,}4447;$ $\qquad$ $x_T = 0{,}1748;$

$y_{\lambda_T} = 0{,}5541;$ $\qquad$ $y_T = 0{,}0044;$

$z_{\lambda_T} = 0{,}0012;$ $\qquad$ $z_T = 0{,}8208.$

Mit Hilfe der Matrix M^{-1} (vgl. 4.3.3.) werden die Normfarbwertanteile in das (B,G,R)-System umgerechnet. Man erhält

b_{λ_T} =-0,0136; b_T = 1,0335;

g_{λ_T} = 0,6386; g_T =-0,1006;

r_{λ_T} = 0,3750; r_T = 0,0672.

Die Farbörter der Wellenlänge λ_T und des tritanopischen Fehlpunktes $\vec{T}$ legen die Dreieckseite N-M (Abb. 18) fest. Die Gleichung dieser Dreieckseite lautet

$$g = 2{,}4016\ r - 0{,}2620.$$

Die Seite M-S soll definitionsgemäß die Alychnenspur sein. Die Alychnengleichung kann aus den Ergebnissen von 5.3.3. - Tab. 9 entnommen werden. Die linke letzte Zeile von Tab. 9 liefert die Alychnengleichung in der folgenden Form:

(50) $0{,}119\ B + 1{,}000\ G + 0{,}547\ R = 0.$

Die Schnittgerade dieser Ebene mit der gr-Farbtafel legt die Dreieckseite M-S fest. Ihre Gleichung lautet

(51) $g = -0{,}4858\ r - 0{,}1351.$

Sie stellt die Spur der Alychne in der gr-Farbtafel dar (Abb. 11). Der Schnittpunkt der Alychnenspur mit der tritanopischen neutralen Zone ergibt den Farbort der Primärvalenz $\vec{M}$. Die Farbwertanteile von $\vec{M}$ lauten

b_M = 1,1126;

g_M = -0,1565;

r_M = 0,0439.

Die zweite Primärvalenz $\vec{S}$ soll ebenfalls ausschließlich chromatische Information tragen, sie muß also als leucht-

dichtefreier Vektor innerhalb der Alychne liegen. Ihr Farbort wird berechnet als Schnittpunkt der Alychnenspur, Gl. (51), mit der Geraden $g + r = 1$, welche die Dreieckseite des Farbdreiecks B-G-R darstellt. Die Farbwertanteile des Primärvalenzvektors $\vec{S}$ lauten

$$b_S = 0{,}000;$$
$$g_S = -1{,}2075;$$
$$r_S = 2{,}2075.$$

Schließlich ist der Neutralpunkt $\vec{N}$ notwendig. Er wurde in einem kleinen Experiment bestimmt als der Punkt auf der tritanopischen Verwechslungsgeraden, der dem trichromatischen Beobachter weder bläulich noch gelblich erschien. Seine Farbwertanteile lauten

$$b_N = 0{,}2960;$$
$$g_N = 0{,}4200;$$
$$r_N = 0{,}2840.$$

Damit ist die vollständige Einbettung des neuen Gegenfarbensystems innerhalb des (B,G,R)-Systems vollzogen (Abb. 18) und das gesuchte Gleichungssystem zur Durchführung der Transformation zwischen beiden Bezugssystemen festgelegt. Die Gleichungen, welche die Darstellung der Gegenfarbenprimärvalenzen $\vec{M}$, $\vec{N}$ und $\vec{S}$ innerhalb des WRIGHTschen (B,G,R)-Systems beschreiben, lauten

$$\begin{aligned}
\vec{M} &= 1{,}1126 \cdot \vec{B} - 0{,}1565 \cdot \vec{G} + 0{,}0439 \cdot \vec{R}; \\
\vec{N} &= 0{,}2960 \cdot \vec{B} + 0{,}4200 \cdot \vec{G} + 0{,}2840 \cdot \vec{R}; \qquad (52) \\
\vec{S} &= 0{,}0000 \cdot \vec{B} - 1{,}2075 \cdot \vec{G} + 2{,}2075 \cdot \vec{R}.
\end{aligned}$$

Die zugehörige Gleichungsmatrix sei G genannt. Durch Transponieren und Invertieren dieser Matrix erhält man die zu G kontragrediente Matrix $\bar{G} = (G^T)^{-1}$. Diese beschreibt das

Gleichungssystem für den Übergang von Farbwerten und Spektralwertfunktionen aus dem WRIGHTschen (B,G,R)-System in das (M,N,S)-Gegenfarbensystem:

$$
\begin{aligned}
M &= 0{,}8469 \cdot B - 0{,}4357 \cdot G - 0{,}2383 \cdot R; \\
N &= 0{,}1950 \cdot B + 1{,}6377 \cdot G + 0{,}8958 \cdot R; \\
S &= -0{,}0419 \cdot B - 0{,}2020 \cdot G + 0{,}3425 \cdot R.
\end{aligned} \tag{53}
$$

Gleichung (53) lautet in Matrizenschreibweise

$$
\vec{C} = \bar{G} \cdot \begin{bmatrix} B \\ G \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ N \\ S \end{bmatrix} . \tag{54}
$$

Nach dieser Gleichung muß eine Farbvalenz $\vec{C}$ mit der Matrix $\bar{G}$ multipliziert werden, um in das Gegenfarbensystem transformiert zu werden. Die Bestimmungsgleichung für den Farbwert N aus Gleichungssystem (53) ist nach Normierung mit der Alychnengleichung, Gl. (50), identisch.

Die Spektralwerte $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ werden wie die Farbwerte transformiert, also

$$
\begin{bmatrix} \bar{m}(\lambda) \\ \bar{n}(\lambda) \\ \bar{s}(\lambda) \end{bmatrix} = \bar{G} \cdot \begin{bmatrix} \bar{b}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{r}(\lambda) \end{bmatrix} \tag{55}
$$

Nach dieser Gleichung wurden die gemessenen Spektralwertfunktionen für die Versuchsperson der Abb. 6 transformiert. Das Ergebnis zeigt Abb. 21.

Gemäß der Definition der tritanopischen Buntsättigungsfunktion wurde diese aus den Funktionen $\bar{s}(\lambda)$ und $\bar{n}(\lambda)$ berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 22 gezeigt.

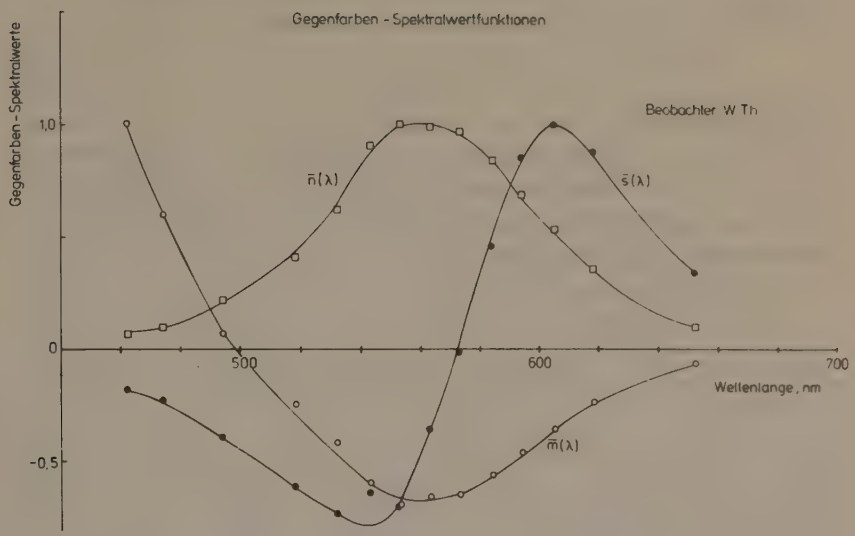


Abb. 21: Gegenfarben-Spektralwertfunktionen der Versuchsperson; $\bar{m}(\lambda)$ stellt die spektrale Empfindlichkeit des blau-gelben Übertragungskanals dar, $\bar{s}(\lambda)$ die des rot-grünen Übertragungskanals; $\bar{n}(\lambda)$ ist die photopische spektrale Hellempfindlichkeit

.5.2. Ergebnisse der spektralen Distinktibilitätsschätzung; Vergleich mit der tritanopischen Sättigungsfunktion

In Abb. 22 ist zusätzlich die nach dem in Abschn. 4.8. beschriebenen Schätzverfahren bestimmte Funktion der spektralen Distinktibilität $\delta(\lambda)$ dargestellt. Es sind die Mittelwerte aus jeweils fünf Schätzungen eingetragen. Für den Wellenlängenbereich unterhalb 460 nm konnte die Messung aus Intensitätsgründen nicht mehr durchgeführt werden, die Kurve bricht daher bei 460 nm ab.

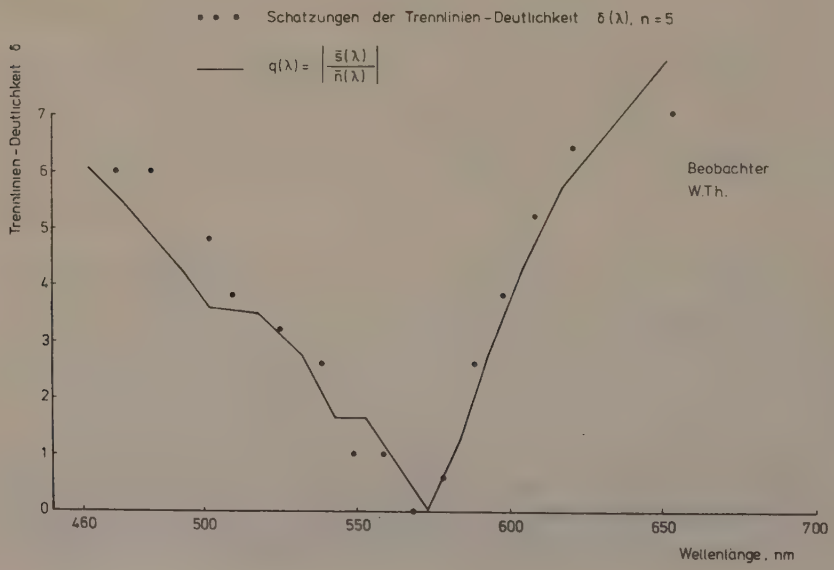


Abb. 22: Vergleich der experimentell gemessenen spektralen Distinktibilität mit der theoretisch ermittelten tritanopischen Sättigungsfunktion

6. Diskussion

6.1. Spektralwertfunktionen, Hellempfindlichkeitsfunktion

An den Spektralwertfunktionen (Abb.7) der Versuchsperson fällt zunächst ein deutlich steilerer Abfall der Funktion $\bar{g}(\lambda)$ im kurzwelligen Bereich auf. Die Funktion $\bar{b}(\lambda)$ liegt auch deutlich unter der des CIE-Normalbeobachters (Abb. 7). Dies spricht zunächst für eine Empfindlichkeitsreduktion der visuellen Pigmente Cyanolab und Chlorolab, welche im kurz- und mittelwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums ihr Empfindlichkeitsmaximum besitzen. Auch die Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$ der Versuchsperson zeigt eine Verminderung im kurzwelligen Bereich (Abb. 10). Dieses Ergebnis überraschte, nachdem die Versuchsperson am Anomaloskop keinerlei Auffälligkeiten gezeigt hatte, welche im Sinne einer alterierten Farbempfindung interpretiert werden könnten. Ich habe deshalb überprüft, inwiefern die Veränderungen der Spektralwertfunktionen möglicherweise durch die radiometrischen Messungen bedingt sind, welche bei der vorliegenden Meßanordnung benötigt wurden. Um dies zu klären, wird eine Vergleichsmöglichkeit der Daten der Versuchsperson mit solchen Daten des CIE-Normalbeobachters gesucht, welche von radiometrischen Größen unabhängig sind. Es bieten sich hierfür die Funktionen der Spektralwertanteile $b(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $r(\lambda)$ an. Wie aus Gleichungssystem (43) (vgl. 4.6.) hervorgeht, kürzt sich bei der Berechnung der Spektralwertanteile die radiometrische Größe $S(\lambda)$ heraus; Ungenauigkeiten in der radiometrischen Messung bleiben damit ohne Einfluß auf den Verlauf der Spektralwertanteilfunktionen. Wie Abb. 8 zeigt, besteht zwischen den Spektralwertanteilen der Versuchsperson und denen des CIE-Normalbeobachters eine gute Übereinstimmung. Die Abweichung der Spektralwertfunktionen

$\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{b}(\lambda)$ ist also auf den Einfluß der radiometrischen Messung zurückzuführen und damit als Methodenartefakt zu bewerten. Dieser Einfluß muß auch bei der Interpretation der Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$ (Abb. 9 und 10) der Versuchsperson berücksichtigt werden.

6.2. Heterochrome Helligkeitsabgleiche, Meßunsicherheit und Reliabilität

Die heterochromen Helligkeitsabgleiche, welche nach dem MDB-Kriterium zur Bestimmung der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion (Abb. 9) durchgeführt wurden, weisen nur geringe Streuungen auf. Der Variationskoeffizient (15) für die Abgleiche innerhalb einer Sitzung ($n = 5$) liegt im Durchschnitt bei 2,1 %; der Variationskoeffizient, welcher sich aus allen Abgleichen aller Sitzungen - also für $n = 25$ - berechnen läßt, liegt bei 1,9 %. Diese Werte sind nicht eigens in Tabellen aufgeführt, sie sind aus den Orginalmeßdaten ermittelt. Die berechneten Variationskoeffizienten demonstrieren nicht nur eine große Genauigkeit - geringe Streubreite innerhalb einer Sitzung - des MDB-Kriteriums, sondern auch eine gute Reliabilität - geringe Streuung von einer Sitzung zur nächsten - der durchgeführten Abgleiche. Das DV-Kriterium erweist sich dagegen als deutlich ungenauer, d.h. die Meßunsicherheit (15) ist für dieses Kriterium grösser. Während der Variationskoeffizient für die Primärvalenzabgleiche für das MDB-Kriterium zwischen 1,1 % und 4,5 % liegt (Tab. 2), liegt dieser für das DV-Kriterium zwischen 3,6 % und 5,6 % (Tab.2). Besonders deutlich wird der Unterschied bei den heterochromen Helligkeitsabgleichen zur Bestimmung der leuchtdichtefreien Quervektoren (Tab. 6). Für das MDB-Kriterium liegt hier der Variationskoeffizient im Durchschnitt bei 1,1 %, während er für das DV-Kriterium 3,2 % beträgt und damit nahezu dreimal so groß ist.

Die schlechte Reliabilität der heterochromen DV-Abgleiche wird bei WALSH (87 , S.289 ff.) ausführlich diskutiert. Insbesondere für größere Farbunterschiede ist die Reproduzierbarkeit der Abgleiche nicht mehr befriedigend. Wenn auch die Messungen innerhalb einer Sitzung gut in sich

übereinstimmen, so kann es doch zu verschiedenen Zeiten zu beträchtlichen Abweichungen kommen. Dies wird damit erklärt, daß es für den Beobachter außergewöhnlich schwierig ist, von größeren Farbunterschieden zugunsten der Leuchtdichtegleichheit zu abstrahieren. Es kann zwar gelingen, innerhalb einer Sitzung die Konzentration auf ein und dasselbe Kriterium der Gleichheit zu lenken, jedoch dient dieses dann mehr als unbewußte Orientierung. In der nächsten Sitzung kann dieses Kriterium bereits vergessen sein und es tritt ein anderes an dessen Stelle. Nach DRESLER (22) kann der heterochrome Direkt-Vergleich nicht mehr zu den zulässigen photometrischen Verfahren gerechnet werden, auch dann nicht, wenn die Messungen einer Meßreihe keine Schwierigkeiten machen (vgl. auch (38, S.56).

Die geringere Streuung und bessere Reliabilität der MDB-Abgleiche gegenüber den DV-Abgleichen wird auch von BOYNTON und KAISER (11) festgestellt. Aus ihren Ergebnissen läßt sich ein durchschnittlicher Variationskoeffizient (15) von 1,8 % für MDB-Abgleiche errechnen, ein solcher von 4,6 % für DV-Abgleiche. Die Meßunsicherheit (15) der Abgleiche in der vorliegenden Untersuchung liegt in der gleichen Größenordnung. Dies ist zunächst verständlich für die Abgleiche nach dem DV-Kriterium; denn das zu beurteilende Gesichtsfeld von BOYNTON und KAISER ist bei Verwendung des DV-Kriteriums mit dem Gesichtsfeld in der vorliegenden Untersuchung nahezu identisch (der Durchmesser des ersteren betrug $1{,}67^{o}$, derjenige des letzteren $1{,}7^{o}$; in beiden Fällen wurde durch Einführung einer künstlichen Trennlinie das Gesichtsfeld zweigeteilt). Überraschend ist jedoch die gute Übereinstimmung der Meßunsicherheit für die MDB-Abgleiche; es wurde eine deutlich größere Streuung der Meßergebnisse erwartet, nachdem die Trennlinie in der vorliegenden Versuchsanordnung den Kriterien von BOYNTON und KAISER (11) nicht ganz gerecht werden konnte. Während diese durch Verwendung besonders scharfer Begrenzungen der Beobachtungsfelder beim

isochromen Abgleich ein vollständiges Verschwinden der Trennlinie erreichen konnten, blieb in den vorliegenden Messungen auch im Zustand des isochromen Abgleichs eine erkennbare, wenn auch sehr feine Linie bestehen. Nach den vorliegenden Ergebnissen scheint nun aber das verwendete DFM-Gerät hinsichtlich der Genauigkeit der MDB-Abgleiche der ursprünglichen Meßanordnung von BOYNTON und KAISER in keiner Weise nachzustehen.

Was den Abgleichvorgang selbst betrifft, so empfand die Versuchsperson sowohl die MDB- als auch die DV-Abgleiche zwischen stark gesättigten Vergleichsreizen und dem ungesättigten Testreiz als wesentlich schwieriger durchführbar als solche zwischen wenig gesättigten Vergleichsreizen und dem Testreiz. Der Unsicherheitsbereich der Beurteilung von gleich- oder ungleichhell nahm mit der Sättigung der Vergleichsreize deutlich zu. Dies war vor allem im lang- und mittelwelligen Spektralbereich ausgeprägt. Die Ursache hinsichtlich der MDB-Abgleiche ist darin zu sehen, daß bei stark gesättigten Vergleichsreizen mit der Veränderung der Helligkeit während des Abgleichvorgangs nur sehr geringe Veränderungen der Trennliniendeutlichkeit einhergingen. Dadurch kann das plötzliche Verschwimmen der Trennlinie nicht so prompt empfunden werden wie beim Abgleich mit wenig gesättigten Vergleichsreizen. Es liegt nahe, einen Zusammenhang zwischen der Sättigung der Vergleichsreize und der Streubreite der heterochromen MDB-Abgleiche anzunehmen; zu einer eindeutigen Aussage müßten jedoch noch wesentlich gezieltere Messungen durchgeführt werden. Aufmerksamkeit sei hier jedoch auf die ungewöhnlich niedrige Meßunsicherheit der MDB-Abgleiche für den Vergleichsreiz $\vec{C}_4$ in Tab. 6 gelenkt, da diese ganz im Gegensatz zu der relativ hohen Sättigung dieses blauen Farbreizes und insbesondere zur hohen Streubreite der dazugehörigen DV-Abgleiche steht. Da $\vec{C}_0$ und $\vec{C}_4$ annähernd auf einer tritanopischen Verwechslungsgeraden liegen, könnte dies bereits auf das geringe spatiale Auflösungsvermögen des blau-gelben Übertragungskanals hinweisen (vgl. 6.6.).

5.3. Additivität, Vergleich beider Abgleichkriterien

Tab. 1 zeigt, daß beim DV-Abgleich der Primärvalenzen mit dem Testreiz $\bar{C}_0$ die stark gesättigten Primärvalenzen grundsätzlich heller bewertet werden als es bei Verwendung des MDB-Kriteriums der Fall war. Dies zeigte sich bereits während der Durchführung der Messungen. War der Testreiz $\bar{C}_0$ mit einer Primärvalenz auf minimale Trennliniendeutlichkeit abgeglichen, und lenkte die Versuchsperson die Aufmerksamkeit von der Trennlinie weg auf den Gesamtaspekt des Photometerfeldes, so erschien das farbige Vergleichsfeld stets heller als das Feld mit dem ungesättigten Testreiz $\bar{C}_0$. Die bei Verwendung des DV-Kriteriums etwas höher eingestellten Werte drücken sich in Tab. 3 in Form von größeren noch nicht normierten Leuchtdichtebeiwerten $\bar{s}'$, $\bar{g}'$ und $\bar{\psi}'$ aus. Wie die Anwendung dieser Werte auf die Farbwerte des Testreizes $\bar{C}_0$ zeigt, kommt es dabei zu einer signifikanten Abweichung vom Additivitätsgesetz. Die entsprechenden Leuchtdichtebeiwerte, welche aus den MDB-Abgleichen ermittelt werden können (Tab. 3), führen dagegen zu einer additiven Leuchtdichte.

Die mangelhafte Additivität der DV-Abgleiche macht deutlich, daß bei Überlagerung der farbigen Vergleichsreize ein gewisser Anteil der ursprünglich gemessenen Helligkeit verloren geht. Der Helligkeitsabgleich der einzelnen Primärvalenzen ergibt Werte, die sich bei Überlagerung der Primärvalenzen nicht vollständig addieren. Entsprechend trägt die Farbvalenz, welche sich anhand der Farbwerte aus den Primärvalenzen nachmischen läßt, weniger Helligkeit, als sich bei exakter Addition der Leuchtdichtebeiwerte ergeben würde. Bei diesem teilweisen Verlust muß es sich um einen Helligkeitsbetrag handeln, der durch das MDB-Kriterium nicht berücksichtigt wird. So gelingt es also mit Hilfe der MDB-Abgleiche einen spezifischen Anteil der subjektiv wahrgenommenen Helligkeit zu eliminieren, und zwar zugunsten einer additiven Leuchtdichte (vgl. auch (49)).

Noch deutlicher wird der Vergleich zwischen den beiden Abgleichkriterien anhand der Abb. 13 - 16. Wie aus Abb. 13 und Abb. 15 hervorgeht, entsprechen die mit Hilfe des MDB-Kriteriums bestimmten Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ in hohem Maße dem Additivitätsgesetz nach ABNEY. Die experimentell gemessene Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$ stimmt mit den berechneten Funktionen $v_{MDB}(\lambda)$ sehr gut überein. Der Abgleich der Primärvalenzen ergibt Werte, die auf eine Korrelation von r = 0,999 (Abb.13) zwischen beiden Funktionen führen. Die Methode,welche sich auf die Bestimmung leuchtdichtefreier Quervektoren stützt, ergibt eine Korrelation von r = 0,998 (Abb.15). Werden dagegen die Leuchtdichtebeiwerte verwendet, welche nach dem DV-Kriterium ermittelt wurden, so zeigen sich, zunächst allerdings nur für die Methode der leuchtdichtefreien Quervektoren, erhebliche Differenzen zwischen gemessener und berechneter Hellempfindlichkeitsfunktion (Abb. 16). Die Korrelation zwischen $v(\lambda)$ und $v_{DV}(\lambda)$ beträgt hier nur r = 0,853 und liegt damit deutlich unter der der beiden Bestimmungsmethoden nach dem MDB-Kriterium. Große Abweichungen treten insbesondere im kurzwelligen Bereich auf. Die Leuchtdichtebeiwerte, welche über den DV-Abgleich der Primärvalenzen bestimmt wurden, sprechen zunächst, sofern man Abb. 14 alleine berücksichtigt, für eine ausreichende Erfüllung des Additivitätsgesetzes. Die zugehörige Korrelation zwischen $v(\lambda)$ und $v_{DV}(\lambda)$ liegt mit r = 0,996 zwar noch unter der der beiden Abgleichmethoden nach dem MDB-Kriterium, von einer wesentlichen Abweichung vom Additivitätsgesetz kann jedoch nicht gesprochen werden. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, daß durch die Normierung der Leuchtdichtebeiwerte auf $\gamma = 1$ bestimmte Abweichungen vom Additivitätsgesetz nicht erfaßt werden, und zwar solche, die mit einer gleichmäßigen, parallelen Veränderung der Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ (etwa im Sinne einer Multiplikation jedes dieser drei Werte mit ein und demselben konstanten Faktor) einhergehen. Abweichungen dieser Art - und solche treten gerade für das DV-Kriterium auf, wie bei der Betrachtung der ursprünglichen, noch nicht normierten Leuchtdichtebeiwerte deutlich wird (Tab. 3) - kommen in der

Darstellungsform der Abb. 13 - 16 nicht zum Ausdruck. Hier stellen sich vielmehr in erster Linie Verschiebungen in der Relation der Leuchtdichtebeiwerte untereinander dar. Ein vollständiges Bild über die Tauglichkeit des DV-Kriteriums - aber auch des MDB-Kriteriums - für die experimentelle Bestimmung additiver Leuchtdichten ergibt sich daher erst aus der Berücksichtigung auch der noch nicht normierten Daten aus Tab. 3.

Insgesamt kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, daß die Verwendung des MDB-Kriteriums zu Helligkeitsabgleichen führt, die dem Additivitätsgesetz nach ABNEY streng gehorchen. Dies ist mit der vorliegenden Untersuchung für eine Versuchsanordnung verifiziert, die sich - wie in der heterochromen Photometrie bei Anwendung des Gleichheits- und des Kontrastprinzips üblich (vgl. (58, S. 121), (87, S. 203), (38, S. 59), (53, S. 80)) - auf die Verwendung eines LUMMER-BRODHUN-Würfels (Abb. 4) als Photometerkopf stützt. Unter Berücksichtigung der geringen Meßunsicherheit und guten Reliabilität der MDB-Abgleiche, wie sie experimentell gesichert werden konnte (vgl. 6.2.), sprechen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung für eine gute Anwendbarkeit des MDB-Kriteriums auch in den herkömmlichen photometrischen Meßanordnungen.

Die mangelhafte Additivität der DV-Abgleiche wurde bereits vielfach beschrieben; für einen teilweisen Überblick sei DRESLER (23) und GUTH, DONLEY und MARROCO (34) erwähnt. Gewöhnlich (vgl. z.B. (44)) wird KOHLRAUSCH die erste systematische Bearbeitung dieses Phänomens zugeschrieben (einen Überblick über seine frühen Arbeiten gibt er selbst (54)). So ging auch der stärkere Helligkeitseindruck, welchen gesättigte Farbreize im Vergleich zu unbunten bewirken, in die Literatur unter der Bezeichnung "HELMHOLTZ-KOHLRAUSCH-Effekt" (81) ein. Er wurde auch mit dem Terminus "Farbglut"

umschrieben, wenn er sich auf besonders gesättigte Farbreize bezog (vgl. z.B. (53)). Auch neuere Untersuchungen, z.B. GUTH (31), BOYNTON und KAISER (11), TESSIER und BLOTTIAU (78), konnten eindeutige Additivitätsfehler nachweisen. Dabei scheint die allgemeine Regel zu sein, daß bei Überlagerung von farbigen Reizen dann ein Helligkeitsverlust auftritt, wenn diese Überlagerung auch mit einem Farbverlust verbunden ist. Dabei erscheint das Feld, in dem die Mischung der farbigen Reize vorgegeben wird, dunkler als es der Leuchtdichteaddition entspricht (34). Dies wurde auch in der vorliegenden Untersuchung festgestellt. KAISER und WYSZECKI (49) beschreiben allerdings auch Experimente, in denen bei Überlagerung von Farbreizen ein zusätzlicher Helligkeitseindruck hervorgerufen wird, also ein Additivitätsversagen vom Verstärkungstyp ("additivity failure of the enhancement type") auftritt. Die Ergebnisse demonstrieren, daß der Helligkeitseindruck, welcher bei den heterochromen DV-Abgleichen berücksichtigt wird (und dabei handelt es sich um den Helligkeitseindruck, der mit dem tatsächlichen subjektiven Empfinden am bestem korreliert, weshalb GUTH und LODGE (35) dafür plädieren, diesen Helligkeitseindruck, "total brightness", letztendlich als den entscheidend relevanten zu akzeptieren und detailliert zu beschreiben), mit der additiven Leuchtdichte, wie sie das ABNEYsche Gesetz beschreibt, nicht identisch ist. Die Additivitätsfehler scheinen dadurch bedingt, daß neben dem achromatischen Übertragungskanal auch die chromatischen Kanäle einen gewissen Helligkeitsbeitrag liefern (vgl. auch (45) und (2)).

6.4. Einfluß der Wahl der Vergleichsreize auf die Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte

Die Ergebnisse aus Tab. 9 und Abb. 13 - 16 machen deutlich, daß bei Verwendung des MDB-Kriteriums die Wahl der Lage der Vergleichsreize $\vec{C}_i$ in der Farbtafel (Abb. 11) so gut wie keinen Einfluß auf die berechneten Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ ausübt. Wird dagegen das DV-Kriterium angewandt, so treten bei den Leuchtdichtebeiwerten erhebliche Veränderungen auf, je nachdem, welche Vergleichsreize zu ihrer Berechnung herangezogen werden. Die Ursache hierfür kommt besonders gut in Abb. 11 und 12 zum Ausdruck. Hier zeigt sich, daß die Farbörter D_i ($i = 1,2 \ldots 6$) der nach dem MDB-Kriterium festgelegten Quervektoren $\vec{D}_i$ ($i = 1,2 \ldots 6$) nahezu auf einer Linie liegen. Diese Linie stellt die Spur der gemittelten Alychne dar, welche sich aus den Quervektoren $\vec{D}_i$ errechnen läßt. Die enge Lagebeziehung der Farbörter D_i zu dieser Alychnenspur ist ein Ausdruck dafür, daß die leuchtdichtefreien Quervektoren $\vec{D}_i$, welche nach dem MDB-Kriterium bestimmt wurden, in nahezu ein und derselben Ebene (Alychne) enden. Die Farbörter Q_i ($i = 1,2 \ldots 6$) der Quervektoren $\vec{Q}_i$ ($i = 1,2 \ldots 6$), welche nach dem DV-Kriterium bestimmt wurden, liegen hingegen weit verstreut in der Farbtafelebene. Die Spur einer ausgleichenden Alychne hätte nur wenig Beziehung zu den einzelnen Farbörtern Q_i, worin sich ausdrückt, daß die Quervektoren $\vec{Q}_i$, welche nach dem DV-Kriterium bestimmt wurden, in sehr unterschiedlichen Ebenen des Farbenraumes enden.

Der offensichtliche Einfluß der Wahl der Vergleichsreize $\vec{C}_i$ auf die Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte deutet ebenfalls (vgl. 6.3.) darauf hin, daß beim Direkt-Vergleich nicht nur der achromatische Übertragungskanal beteiligt sein kann, sondern vielmehr auch chromatische Erregungen eine wesentliche Rolle spielen. Ein Einfluß in dieser Hinsicht existiert für das MDB-Kriterium dagegen nicht.

6.5. Modell der Hellempfindung (chromatische Helligkeit)

Zur Interpretation der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit schlage ich ein Modell der Hellempfindung vor, welches davon ausgeht, daß Helligkeit nicht nur durch den achromatischen Übertragungskanal vermittelt wird, sondern auch zum Teil durch die chromatischen Kanäle. Es wird angenommen, daß der Eindruck einer Trennlinie immer dann entsteht, wenn die Erregung eines oder mehrer Übertragungskanäle durch die beiden Gesichtsfeldhälften Differenzen aufweist. Eine minimale Trennliniendeutlichkeit soll dann entstehen, wenn beide Felder imstande sind, den achromatischen Kanal in gerade identischer Weise zu erregen. Die Tatsache, daß dann das farbige Feld heller erscheint, erklärt sich aus einem zusätzlichen Helligkeitsbeitrag, welcher durch die Erregung der chromatischen Kanäle hervorgerufen wird.

Nach diesem Modell liefern die MDB-Abgleiche deshalb eine additive Leuchtdichte, weil bei ihnen - ähnlich wie beim Flimmer-Kriterium - ausschließlich die achromatische lineare Helligkeit berücksichtigt wird. So wird in der Flimmerphotometrie, welche bekanntlich auch zu einer additiven Leuchtdichte führt, die Flimmerfrequenz so hoch gewählt, daß sie über der Verschmelzungsfrequenz der chromatischen Kanäle liegt. Diese besitzen geringeres temporales Auflösungsvermögen als der chromatische Kanal (59), so daß der Helligkeitsabgleich dann ausschließlich das achromatische Erregungsniveau berücksichtigt (29) (vgl. auch 2.2.). Da nun auch mit Hilfe der MDB-Abgleiche achromatische Differenzen eliminiert werden können, ist verständlich, daß mit diesem Kriterium das Verhalten der beiden Übertragungssysteme getrennt beurteilt werden kann. Durch die Einstellung auf minimale Trennliniendeutlichkeit wird die Erregung des achromatischen Systems ausgeglichen, so daß die resultierende Trennliniendeutlichkeit ausschließlich durch chromatische

Unterschiede bedingt ist. Die heterochromen Helligkeitsabgleiche nach dem MDB-Kriterium müßten also auf eine Hellempfindlichkeitsfunktion führen, die mit der nach dem Flimmerkriterium übereinstimmt. KAISER (46) konnte diese Annahme durch eine Untersuchung bestätigen, in der heterochrome MDB-Abgleiche mit Ergebnissen der Flimmerphotometrie direkt verglichen wurden. Es zeigte sich, daß MDB- und Flimmerkriterium identische Resultate lieferten, welche sich ihrerseits jedoch deutlich von denen nach dem DV-Kriterium unterschieden. WAGNER und BOYNTON (85) stellten fest, daß die nach dem MDB-Kriterium ermittelte Hellempfindlichkeitsfunktion sehr gute Übereinstimmung zeigt mit der Hellempfindlichkeitsfunktion nach dem Flimmerkriterium und mit der Funktion $V(\lambda)$ des CIE-Normalbeobachters, modifiziert nach JUDD 1951 (43). Dies erhärtet die ursprüngliche These, nach welcher eine minimale Trennliniendeutlichkeit dann auftreten soll, wenn die Erregung des achromatischen neuronalen Systems ausgeglichen ist.

Eine weitere Unterstützung hierfür liefern KAISER und GREENSPON (47). Sie glichen ein chromatisches Feld mit einem weißen Feld auf minimale Trennliniendeutlichkeit ab. Dabei resultierte - wie auch die Messungen in der vorliegenden Arbeit zeigen (vgl. 6.2.) - eine Einstellung, bei der das farbige Feld deutlich heller erschien als das weiße. Wurde nun das dunklere weiße Feld um den Betrag heller gewählt, welcher nötig war, um dieses Feld mit dem chromatischen Feld gleichhell erscheinen zu lassen, so nahm die Deutlichkeit der Trennlinie zu. Wurde dieser zusätzliche Betrag an weißem Licht vom achromatischen Feld wieder entfernt und statt dessen zu dem ursprünglich bereits heller erscheinenden farbigen Feld addiert, so zeigt sich keine Veränderung der Trennliniendeutlichkeit. Dies spricht dafür, daß die Helligkeitsdifferenz für sich genommen nicht der entscheidende Parameter sein kann, welcher

die Deutlichkeit der Trennlinie bestimmt, vielmehr scheinen dafür die Erregungsunterschiede im achromatischen Übertragungskanal verantwortlich zu sein.

Weitere Unterstützung dieser Annahme liefern auch elektrophysiologische Untersuchungen. DE VALOIS und PEASE (20) berichten, daß bei Ableitungen aus dem Nucleus geniculatum laterale des Affen keine Verstärkungserscheinungen oder MACH-Band-Phänomene (27) auftraten, wenn ein weißes und ein grünes Feld in der Luminanz angeglichen wurden. Wurde jedoch eine Luminanzdifferenz eingeführt, so konnte auf jeder Seite der Trennlinie, welche beide Gesichtsfeldhälften voneinander abgrenzte, eine zusätzliche Spitze neuronaler Aktivität festgestellt werden (vgl. auch (18)). Aus diesen Untersuchungen kann geschlossen werden, daß das Fehlen dieser Verstärkungsphänomene - bei heterochromatischen Feldern gleicher Luminanz - psychophysisch als minimale Trennliniendeutlichkeit manifest wird.

Schließlich sei noch erwähnt, daß die spektrale Empfindlichkeitsfunktion von nicht-antagonistisch reagierenden Zellen (nonopponent excitatory cells), die vom Nucleus geniculatum laterale des Affen durch DE VALOIS, ABRAMOV und JACOBS (19) registriert wurde, der Hellempfindlichkeitsfunktion des CIE-Normalbeobachters ähnelt. Dies kann als weiterer Beleg dafür angesehen werden, daß die Information der additiven Leuchtdichte durch den achromatischen Kanal vermittelt wird.

Das von mir vorgeschlagene Modell erklärt auch die Additivitätsfehler, welche bei Verwendung des DV-Kriteriums auftreten. Da beim Direkt-Vergleich auch die Helligkeit der chromatischen Kanäle berücksichtigt wird, kommt es bei Farbreizüberlagerungen durch das gegensinnige Antwortverhalten innerhalb dieser Kanäle zu Auslöschphänomenen. Während zum Beispiel ein roter gesättigter Farbreiz und ein dazu komplementärer grüner Farbreiz bei alleiniger Darbietung den rot-grünen Farbübertragungskanal deutlich erregen und damit einen zusätzlichen

Helligkeitseindruck - im Sinne einer durch den chromatischen Kanal vermittelten "chromatischen Helligkeit" - hervorrufen, wird bei Überlagerung der beiden Reize eine vollständige Nivellierung des Erregungsniveaus im chromatischen Kanal bewirkt. Der ursprünglich registrierte zusätzliche Helligkeitsbeitrag geht verloren.

Dies erklärt auch die starke Abhängigkeit der berechneten Leuchtdichtebeiwerte von der Wahl der Vergleichsreize (vgl. 6.4.) bei Verwendung des DV-Kriteriums. Die verschiedenfarbigen Vergleichsreize bewirken unterschiedliche Erregungen in den chromatischen Übertragungskanälen. Dadurch kommt es, unter dem Einfluß der "chromatischen Helligkeit", zu unterschiedlichen Helligkeitsbeiträgen, die sich auf die lineare achromatische Helligkeit auflagern.

Das vorgestellte Modell ist konsistent mit der von BOYNTON (6), (8) vorgeschlagenen Theorie der Farbverarbeitung, die von der Existenz chromatischer und achromatischer neuraler Elemente ("brain elements") im menschlichen visuellen Cortex ausgeht. Danach sollen sich chromatische (B,G,Y,R) und achromatische (W) Elemente unterscheiden lassen. Die Erregung der achromatischen Elemente ist mit der Empfindung von Weiß und Helligkeit verknüpft, die der chromatischen Elemente mit der Empfindung von Farbe und ebenfalls von Helligkeit.

Weiterhin steht das Modell mit Ergebnissen von GUTH, DONLEY und MARROCCO (34) und GUTH und LODGE (35) in Einklang, welche bei der Untersuchung von Schwellenwerten überlagerter Farbreize deutliche Abweichungen vom Additivitätsgesetz feststellen konnten (vgl. auch GUTH (32)). Diese Fehler werden von den Autoren anhand einer Theorie interpretiert, die ursprunglich zur Erklärung von Luminanz-Schwellenwert-Messungen an normal- und fehlsichtigen Versuchspersonen entwickelt wurde. Danach sollen sowohl Schwellenwertinformationen als

auch Helligkeitsinformationen durch das kombinierte Antwortverhalten des achromatischen und des Gegenfarbensytems vermittelt werden. Die Erregungsgrößen beider Übertragungskanäle addieren sich wie Vektoren in einem dreidimensionalen Raum, dessen Achsen die Primärvalenzen zweier Gegenfarbenkanäle (P und T) und eines achromatischen Kanals (A) bilden (vgl. GUTH u. LODGE (35) u, (36)). Das Modell beinhaltet die Hypothese, daß das normale trichromatische Sehen als aus tritanopischen und deuteranopischen Komponenten zusammengesetzt angesehen werden kann. Die drei Dimensionen des zur Theorie gehörigen Farbenraums repräsentieren Beiträge zur Farbwahrnehmung, welche von den beiden chromatischen Systemen P und T und von dem achromatischen System A stammen. Das beschriebene Modell läßt sich mittels geeigneter Transformationsgleichungen aus den CIE-Normalspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda),\bar{y}(\lambda),\bar{z}(\lambda)$ ableiten und ist damit vollständig konsistent mit den farbmetrischen Daten des CIE-Normalbeobachters. Die additive Leuchtdichte, wie sie das ABNEYsche Gesetz definiert, soll in diesem System ausschließlich durch den achromatischen Kanal getragen werden (GUTH und LODGE (35) bezeichnen sie mit "luminance"), während die Helligkeit, wie sie im Direkt-Vergleich oder in Schwellenwertmessungen festgelegt wird, als Länge eines Vektors im dreidimensionalen Farbenraum aufzufassen ist (sie wird daher als "vector luminance" bezeichnet).

Bezogen auf das in der vorliegenden Arbeit verwendete Gegenfarbensystem (M,N,S) (Abb. 20) bedeutet dies folgendes: Die Primärvalenz $\vec{N}$ steht ausschließlich für die Größe "Leuchtdichte"; die Gegenfarbenprimärvalenzen $\vec{M}$ und $\vec{S}$ tragen neben ihrer chromatischen Information auch einen Teil der Helligkeitsinformation. Das heißt also, der achromatische Kanal $\vec{N}$ beschreibt nicht die Hellempfindlichkeit schlechthin, sondern nur den Anteil, der streng additiv ist, also die Leuchtdichte, wie sie das ABNEYsche Gesetz definiert. Der Farbwert N ist mit dieser Leuchtdichte L identisch. Die tatsächliche Helligkeit einer

[illegible] $\vec{f}$, wie sie etwa beim Direkt-Vergleich subjektiv wahrgenommen wird. Setzt sich dann mit der Länge des Farbvektors $\vec{f}$, d.h. mit dem Betrag $|\vec{f}|$ dieses Vektors, [illegible] Multiplikation von der gesamten Gegenfarbenraum-Ebene [illegible] darstellt, so erhält man für die Helligkeit w' der Farbvalenz $\vec{f}$ - analog zur Vektorleuchtdichte „vector luminance" von Gift und Lozac'h [65] - folgenden Ausdruck:

$$w' = \sqrt{v^2 + u^2 + s^2} \quad .$$

6.6. Spatiales Auflösungsvermögen

Da also beim MDB-Abgleich zweier Photometerhalbfelder die achromatischen Differenzen zwischen beiden Feldern vollständig ausgeglichen werden, muß die dann noch verbleibende Trennliniendeutlichkeit ausschließlich durch die Aktivität der chromatischen Kanäle bedingt sein.

Wie sich an den vorliegenden Ergebnissen zeigt, tragt der blau-gelbe Übertragungskanal nur sehr wenig oder überhaupt nicht zur Trennliniendeutlichkeit bei. Farbreize, die auf den konvergierenden Geraden in Abb. 17 liegen und durch Helligkeitsvariation auf eine minimale Trennliniendeutlichkeit eingestellt werden, bilden so gut wie keine Trennlinie miteinander aus. Diese Geraden ähneln sehr stark den Verwechslungsgeraden eines Tritanopen. Sie konvergieren in der Nähe des tritanopischen Fehlpunktes. Variiert man den Vergleichsreiz entlang einer solchen Geraden, so ändert sich die Trennliniendeutlichkeit kaum, variiert man ihn dagegen entlang einer Geraden wie "CL" in Abb. 17, so treten sehr starke Veränderungen auf. Dies bedeutet also, daß die Deutlichkeit der Trennlinie in erster Linie durch das Verhältnis der Rot-Erregung zur Grün-Erregung bedingt ist. Der rot-grüne Übertragungskanal weist danach ein wesentlich besseres spatiales Auflösungsvermögen auf als der blau-gelbe.

TANSLEY und BOYNTON (74) konnten dieses Ergebnis durch eigene Untersuchungen bestätigen, in welchen sie die Methode der multidimensionalen Skalierung auf Daten anwandten, welche aus der Bestimmung der Trennliniendeutlichkeit zwischen einer großen Anzahl monochromatischer und entsättigter Farbreize gewonnen wurden. Sie konnten finden, daß sich alle Ausprägungsgrade der Trennliniendeutlichkeit geometrisch in Form

einer einzigen Linie darstellen lassen und nicht wie ursprünglich angenommen (vgl. (13)) in einem zweidimensionalen Raum. Farbreize, welche auf tritanopischen Verwechslungsgeraden lagen, bildeten keine Trennlinie miteinander aus.

Auch GREEN (30) und KELLY (50) kamen zu dem Ergebnis, daß die Zapfen, welche im lang- und mittelwelligen Bereich sensibel sind, wesentlich besseres spatiales Auflösungsvermögen aufweisen als die im kurzwelligen Bereich sensiblen Blau-Zapfen.

Diese Ergebnisse sprechen also dafür, daß sich ein normaler Trichromat hinsichtlich der Beurteilung der Trennlinie wie ein Tritanop verhält. Zur Vermittlung der Trennliniendeutlichkeit verbleibt also nur noch der rot-grüne Übertragungskanal. Danach müßte die Trennlinie für Dichromaten, bei welchen dieser Kanal ausgefallen ist, die Trennlinie nicht auflösbar sein. Dies bestätigen TANSLEY und GLUSHKO (76) anhand der Untersuchung von Protanopen und Deuteranopen. Beide Dichromatentypen konnten durch reine Helligkeitsvariation die Trennlinie zwischen beliebig farbigen Feldern vollständig zum Verschwinden bringen.

Vergleicht aber ein normalsichtiger Trichromat einen weißen Testreiz mit chromatischen Vergleichsreizen bei MDB-Bedingung, so müßte - da die achromatischen Unterschiede ausgeglichen sind - die Trennliniendeutlichkeit mit der tritanopischen Sättigung des chromatischen Reizes korrelieren. Wie Abb. 22 zeigt, kann diese Annahme durch die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung bestätigt werden. Die Schätzfunktion der spektralen Distinktibilität $\delta(\lambda)$ zeigt mit der ermittelten tritanopischen Sättigungsfunktion $q(\lambda)$ eine gute Übereinstimmung.

Diese Ergebnisse stehen in einem deutlichen Gegensatz zu der traditionellen Auffassung, nach welcher sowohl das temporale

wie auch das spatiale Auflösungsvermögen des achromatischen Systems besser als das des chromatischen Übertragungssystems sein soll (vgl. z.B. (51) und (9, S. 299); einen Oberblick über spatiales Sehen gibt SEKULER (71)). Wie die vorliegenden Messungen jedoch zeigen, kann dies nur für den blau-gelben Übertragungskanal bestätigt werden, der rot-grüne Kanal weist hingegen ein gutes spatiales Auflösungsvermögen auf. Zu diesem modifizierten Verständnis tendieren auch neuere Untersuchungen. So legt INGLING (40) den Gedanken nahe, daß auch der rot-grüne chromatische Kanal auf Luminanzdifferenzen mit gewissen Verstärkungsmechanismen reagieren kann. Durch seine kleinen rezeptiven Felder und durch die gegensinnige retinale Verschaltung der R- und G-Zapfen soll dieser Kanal imstande sein, auf Luminanzdifferenzen zwischen zwei Feldern mit Antworten nach Art MACHscher Helligkeitsstreifen zu reagieren. Auch die Tatsache, daß die Verwendung eines Deutlichkeitskriteriums bei heterochromen Helligkeiten auf eine additive Leuchtdichte führt, darf nicht ohne weiteres als Beleg dafür angesehen werden, daß das gute spatiale Auflösungsvermögen ausschließlich durch den achromatischen Kanal vermittelt wird (vgl. (58)). Diese Vorstellung ist imstande, die bisherigen Ergebnisse über MDB-Abgleiche gut zu interpretieren (41). Bei reinem chromatischen Kontrast, also bei identischer Luminanz im linken und rechten Photometerhalbfeld reagiert der rot-grüne Übertragungskanal mit einem im Verlauf über die Trennlinie hinweg gleichmäßigen Anstieg oder Abfall der Erregung. Im direkt an die Trennlinie anschließenden Bereich kommt es zu keinen MACHschen Buntheitsstreifen; die Trennlinie erscheint wenig distinkt. Treten dagegen Luminanzdifferenzen auf, so reagiert der rot-grüne Obertragungskanal mit einem Antwortverhalten nach Art von MACHschen Helligkeitsstreifen, wodurch die Trennliniendeutlichkeit entscheidend zunimmt. Nach INGLING kann für diese Deutlichkeitszunahme der achromatische Kanal nicht verantwortlich sein,

weil die großen rezeptiven Felder dieses Kanals eine Auflösung der untersuchten Trennlinie nicht ermöglichen würden. Die Tatsache, daß gerade bei Luminanzausgleich das Verschwimmen der Trennlinie auftritt, muß also letztlich als eine Eigenschaft des rot-grünen Übertragungskanals angesehen werden, eine Eigenschaft allerdings, die bisher wenig Beachtung fand. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sind geeignet, diese Vorstellung zu erhärten.

6.7. Ausblick

Im Anschluß an die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wäre von Interesse, wie sich die Trennlinien-Distinktibilität, also die Schätzfunktion $\delta(\lambda)$, im Wellenlängenbereich $\lambda < 460$ nm verhalten würde. Würde die Funktion in diesem Bereich einen erneuten absteigenden Ast aufweisen und damit einen Verlauf wie die tritanopische Sättigungsfunktion $q(\lambda)$ (Abb. 19, unten) zeigen, so bedeutete dies zunächst eine weitere Bestätigung dafür, daß die Trennlinien-Distinktibilität durch die tritanopische Sättigungsfunktion angemessen beschrieben werden kann. TANSLEY und VALBERG (77) konnten dies durch Ausdehnung der Messungen auf den Bereich von $\lambda_1 = 400$ nm bis $\lambda_2 = 700$ nm nachweisen. Sie fanden ein Maximum der Schätzfunktion bei 460 nm und eine Abnahme der Funktion im Bereich der Wellenlängen von $\lambda < 460$ nm. Von ganz besonderem Interesse wäre jedoch, ob sich ein weiterer Nullpunkt - etwa unterhalb 400 nm - zeigen würde, oder ob sich vielmehr eine asymptotische Annäherung an die Abszisse oder gar ein paralleler Verlauf hierzu einstellen würde. Das letztere Verhalten zeigt z.B. die protanopische Buntsättigung im längerwelligen Bereich für $\lambda > 530$ nm (vgl. (52)). Die Klärung des Kurvenverlaufs gelingt jedoch nicht im Rahmen farbmetrischer Konstruktionen, sondern erfordert die weitere experimentelle Ermittlung der Schätzfunktion $\delta(\lambda)$ im bisher noch nicht untersuchten kurzwelligen Bereich. Eine Klärung dieser Problematik ist zugleich eng verknüpft mit der Erklärung der Violett-Empfindung. Denn sollte es im kurzwelligen Bereich nach einem weiteren Nullpunkt der Schätzfunktion zu einem erneuten Anstieg kommen, so macht dies unwahrscheinlich, daß die Violett-Empfindung durch die Erregung der "Blauzapfen" bedingt ist. Die "Blauzapfen" unterliegen nämlich dem LIEBMANN-Effekt (vgl. Abschn. 1. u. (56)) und können, wie die vorliegende Untersuchung auch gezeigt hat, für eine Zunahme der Trennlinien-Distinktibilität im kurzwelli-

gen Bereich nicht verantwortlich gemacht werden. Es müßten andere Mechanismen in Erwägung gezogen werden. Maßgeblich für die Beschreibung der spektralen Trennlinien-Distinktibilität wäre dann auch nicht die Funktion $\bar{s}(\lambda)$ (vgl. Abschn. 5.5.1. sondern vielmehr eine Funktion, welche im kurzwelligen Bereich einen zweiten Nulldurchgang besitzt, also etwa die tetartanopische Buntsättigung (vgl. (68) u. (83)). Eine solche Funktion müßte dann auch zur Erklärung der Violett-Empfindung herangezogen werden. Verliefe dagegen die experimentell ermittelte Schätzfunktion $\delta(\lambda)$ im kurzwelligen Bereich asymptotisch zur Abszisse - gleichbedeutend mit stetiger Abnahme der Trennlinien-Distinktibilität -, so stände dies grundsätzlich im Einklang mit der Vorstellung, daß die Erregung der "Blauzapfen" die entscheidende Größe für die Violett-Empfindung darstellt. Denn diese "Blauzapfen"-Erregung würde im kurzwelligen Bereich die Violett-Empfindung hervorrufen, ohne jedoch - aufgrund des LIEBMANN-Effekts- eine Zunahme der Trennlinien-Distinktibilität bewirken zu können.

7. Zusammenfassung

Für eine trichromatische Versuchsperson wurden heterochrome Helligkeitsabgleiche nach Direkt-Vergleich-(DV)-Kriterium mit solchen nach dem Minimally-Distinct-Border-(MDB)-Kriterium verglichen. Hinsichtlich Meßunsicherheit, Reliabilität und Additivität zeigten sich die MDB-Abgleiche den DV-Abgleichen deutlich überlegen. Der Variationskoeffizient der DV-Abgleiche lag im Durchschnitt bei 3,7 %, der der MDB-Abgleiche bei 1,7 %. Die berechneten Leuchtdichtebeiwerte führten für das MDB-Kriterium bei Anwendung auf die gemessenen Spektralwertfunktionen zu Hellempfindlichkeitsfunktionen, die mit der Hellempfindlichkeitsfunktion, welche nach dem MDB-Kriterium bestimmt wurde, hoch korrelierten ($r = 0{,}998$ und $r = 0{,}999$). Die berechneten Hellempfindlichkeitsfunktionen, welche über die Leuchtdichtebeiwerte der DV-Abgleiche ermittelt wurden, zeigten dagegen geringere Übereinstimmung ($r = 0{,}853$). Die Bestimmung der Leuchtdichtebeiwerte war für das MDB-Kriterium von der Lage der Vergleichsreize im Farbenraum unabhängig, während sich für das DV-Kriterium ein deutlicher Einfluß bemerkbar machte. Die DV-Abgleiche zeigten bei Überlagerung hochsignifikante ($p < 0{,}005$) Abweichungen vom ABNEYschen Gesetz, die MDB-Abgleiche erwiesen sich dagegen als streng additiv. Die Ergebnisse sprechen für die Anwendbarkeit des MDB-Kriteriums in der heterochromen Photometrie, und zwar auch bei Verwendung herkömmlicher Meßanordnungen.

Desweiteren wurden MDB-Abgleiche vorgenommen, bei denen die Farbart der Vergleichsreize teilweise variierbar war. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse demonstrieren, daß der blau-gelbe Übertragungskanal zur Deutlichkeitsausprägung der Trennlinie keinen Beitrag liefert. Entsprechend zeigte die experimentelle Bestimmung der spektralen Distinktibilität eine gute Übereinstimmung mit der tritanopischen Sättigungsfunktion. Der rot-grüne Kanal wies hingegen ein gutes spatiales Auflösungsvermögen auf, was im Gegensatz zu gewissen traditionellen

Auffassungen steht, nach welchen neben dem guten temporalen auch das gute spatiale Auflösungsvermögen ausschließlich durch den achromatischen Übertragungskanal vermittelt wird.

Zur Herleitung der individuellen tritanopischen Buntsättigungsfunktion eines Trichromaten wurde auf die spezifischen Eigenschaften eines Gegenfarbensystems zurückgegriffen. Es wurde besondere Betonung auf die Aufstellung eines solchen Gegenfarbensystems gelegt und auf dessen vollständige vektorielle Einbettung in das WRIGHTsche (B,G,R)-System, welche auf der Grundlage von Orginalmessungen unter Berücksichtigung tritanopischer Daten durchgeführt wurde. Die experimentelle Ermittlung der individuellen Alychne für die Versuchsperson spielte hierbei eine entscheidende Rolle.

Die Ergebnisse werden an einem Modell der Hellempfindung diskutiert, welches einen eigenen Helligkeitsbeitrag der chromatischen Übertragungskanäle neben dem achromatischen Kanal postuliert. Dieses Modell ist konsistent mit neueren Farbverarbeitungstheorien und mit Vorstellungen über den Einfluß chromatischer und achromatischer Erregungsgrößen auf das spatiale Auflösungsvermögen.

8. Schrifttum

(1) ABNEY and FESTING, The bakerian lecture - Colour photometry. Phil.Trans.Roy.Soc.London 177/II (1887), S. 423-456

(2) BAUER, H.D. and RÖHLER, R., Brightness generation in the human visual system. Colour-Brightness. A contribution of the cortical colour channels to brightness sensation. Vision Res. 17 (1977), S. 1211-1216

(3) BECK,H. und RICHTER,M., Neukonstruktion des Dreifarben-meßgerätes nach Guild-Bechstein. Farbe 7 (1958), S.141-152

(4) BOREWITSCH,S.I., Determinanten und Matrizen. Teubner, Leipzig 1972

(5) BOUMA,P.J., Farbe und Farbwahrnehmung. N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken Eindhoven (Holland) 1951

(6) BOYNTON,R.M., Theory of color vision. J.Opt.Soc.Amer. 50 (1960), S.929-944

(7) BOYNTON,R.M., Implications of the minimally distinct border. J.Opt.Soc.Amer. 63 (1973), S.1037-1043

(8) BOYNTON,R.M., Ten Years of Research with the Minimally Distinct Border. In: ARMINGTON, J.C., KRAUSKOPF,J. and WOOTEN,B.R. (Edit.): Visual Psychophysics and Physiology. Academic Press, New York, San Francisco, London 1978 , S.193-207

(9) BOYNTON,R.M., Human Color Vision.Holt, Rinehart and Winston, New York, Chicago, San Francisco, Dallas, Montreal, Toronto, London, Sydney 1979

(10) BOYNTON,R.M. and GREENSPON,T.S., The distinctness of borders formed between equally saturated, psychologically unique fields. Vision Res. 12 (1972), S.495-507

(11) BOYNTON,R.M. and KAISER,P.K., Vision: The Additivity Law Made To Work for Heterochromatic Photometry with Bipartite Fields. Science 161 (1968), S.366-368

(12) BOYNTON,R.M. and KAISER,P.K., Temporal analog of the minimally distinct border. Vision Res. 18 (1978), S.111-113

(13) BOYNTON,R.M. and WAGNER,H.G., Color differences assessed by the Minimally-Distinct Border Method. In: VOS,J.J., FRIELE,L.F.C.and WALRAVEN,P.L. (Eds.): Color Metrics. Soesterberg, International Color Association (AIC) 1972, s.26-35

(14) BUCK,S.L., FROME,F. and BOYNTON,R.M., Initial distinctness and subsequent fading of minimally distinct borders. J.Opt.Soc.Amer. 67 (1977), S.1126-1128

(15) DEUTSCHE NORMEN: DIN 1319, Grundbegriffe der Meßtechnik. Beuth, Berlin Köln (1972)

(16) DEUTSCHE NORMEN: DIN 5031, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik. Beuth, Berlin, Köln (1967-71)

(17) DEUTSCHE NORMEN: DIN 5033, Farbmessung. Beuth, Berlin, Köln (1970-79)

(18) DE VALOIS,R.L., Spatial tuning of LGN and cortical cells in monkey visual system. In: (71), S.60-63

(19) DE VALOIS,R.L., ABRAMOV,I. and JACOBS,G.H., Analysis of response patterns of LGN cells. J.Opt.Soc.Amer. 56 (1966), S.966-977

(20) DE VALOIS,R.L. and PEASE,P.L., Contours and Contrast: Responses of Monkey Lateral Geniculate Nucleus Cells to Luminance and Color Figures. Science 171 (1971), S.694-696

(21) DIEUDONNE,J., Grundzüge der modernen Analysis. Vieweg u. Sohn, Braunschweig 1971

(22) DRESLER, A., Ober den Einfluß von Farbton und Sättigung auf die Messung verschiedenfarbiger Lichter. Licht 7 (1937), S.203-208

(23) DRESLER, A., The nonadditivity of heterochromatic brightness. Trans.Illum.Eng.Soc.London 18 (1953), S.141-165

(24) FACHNORMENAUSSCHUSS FARBE (FNF), Anweisung für die Untersuchung des Farbensehens mit dem Anomaloskop nach Nagel. Farbe 6 (1957), S.115-119

(25) FARNSWORTH,D.,The Farnsworth dichotomous test for color blindness, panel D-15.ThePsychological Corporation, New York 1947

(26) FARNSWORTH,D., The Farnsworth-Munsell 100-Hue test for the examination of color discrimination. Munsell Color Company, Baltimore 1957

(27) FIORENTINI,A., Mach Band Phenomena. In: JAMESON,D. and L.M.HURVICH (Edit.), Visual Psychophysics. Vol.VII/4, Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1972

(28) FROME,F.S., BUCK,S.L., and BOYNTON,R.M., Visibility of borders: separate and combined effects of color differences, luminance contrast, and luminance level. J.Opt.Soc.Amer. 71 (1981), S.145-150

(29) FUKADA,Y., MOTOKAWA,A.C., NORTON,A.C., and TASAKI,K, Functional significance of conduction velocity in the transfer of flicker information in the optic nerve of the cat. J.Neurophsiol. 29 (1966), S.698-714

(30) GREEN,D.G., The contrast sensitivity of the Color mechanisms of the human eye. J.Physiol. 196 (1968), S.415-429

(31) GUTH,S.L., Luminance Addition: General Considerations and Some Results at Foveal Threshold. J.Opt.Soc.Amer. 55 (1965), S.718-722

(32) GUTH,S.L., Nonadditivity and inhibition among chromatic luminances at threshold. Vision Res. 7 (1967), S.319-328

(33) GUTH,S.L., A new color model. In: VOS,J.J., FRIELE,L.F.C., and WALRAVEN,P.L. (Edit.), Color Metrics. Soesterberg, International Color Association (AIC) 1972

(34) GUTH,S.L., DONLEY,N.J., and MARROCCO,R.T., On luminance additivity and related topics. Vision Res. 9 (1969), S.537-575

(35) GUTH,S.L. and LODGE,H.R., Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity, and a new color model. J.Opt.Soc.Amer. 63 (1973), S.450-462

(36) GUTH,S.L., MASSOF,R.W., and BENZSCHAWEL,T., Vector model for normal and dichromatic color vision. J.Opt.Soc.Amer. 70 (1980), S.197-212

(37) HEINSIUS,E., Farbsinnstörungen und ihre Prüfung in der Praxis. Enke, Stuttgart 1973

(38) HELBIG,E., Grundlagen der Lichtmeßtechnik. Akademische Verlagsgesellschaft Geest u. Portig, Leipzig 1972

(39) HELLER,K. und ROSEMANN,B., Planung und Auswertung empirischer Untersuchungen. Klett, Stuttgart 1974

(40) INGLING,C.R., Luminance and opponent color contributions to visual detections and to temporal and spatial integration: Comment. J.Opt.Soc.Amer. 68 (1978), S.1143-1146

(41) INGLING,C.R. and DRUM,B.A., Retinal receptive fields: Correlations between psychophysics and electrophysiology. Vision Res. 13 (1973), S.1151-1163

(42) INGLING,C.R., HUONG-PENG TSOU,B., GAST,T.J., BURNS,S.A., EMERICK,J.O. and RIESENBERG,L., The achromatic channel - I. The nonlinearity of minimum-border and flicker matches. Vision Res. 18 (1978), S.379-390

(43) JUDD,D.B., Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight. CIE Proc. Vol.I, part 7, p.11, Stockholm 1951

(44) JUDD,D.B., A new look at the measurement of light and color. Illum.Engng 53 (1958), S.61-71

(45) KAISER,P.K., Luminance and Brightness. Applied Optics 10 (1971), S.2768-2770

(46) KAISER,P.K., Minimally Distinct Border as a Preferred Psychophysical Criterion in Visual Heterochromatic Photometry. J.Opt.Soc.Amer. 61 (1971), S.966-971

(47) KAISER,P.K. and GREESPON,T.S., Brightness Difference and its Relation to the Distinctness of a Border. J.Opt.Soc.Amer. 61 (1971), S.962-965

(48) KAISER,P.K., HERZBERG,P.A. and BOYNTON,R.M., Chromatic border distinctness and its relation to saturation. Vision Res. 11 (1971), S.953-968

(49) KAISER,P.K. and WYSZECKI,G., Additivity Failures in Heterochromatic Brightness Matching. Color Res.Applic. 3 (1978), S.177-182

(50) KELLY,D.H., Lateral inhibition in human color mechanism. J.Physiol. 228 (1973), S.55-72

(51) KING-SMITH,P.E. and GARDEN,D., Luminance and opponent-color contributions to visual detection and adaptation and to temporal and spatial integration. J.Opt.Soc.Amer. 66 (1976), S.709-717

(52) KLAUDER,A. und SCHEIBNER,H., Dichromatisches Gegenfarbensehen. Farbe+Design 15/16 (1980), S.65-70

(53) KÖNIG,H., Der Begriff der Helligkeit. Éditions du Griffon, Neuchatel 1947

(54) KOHLRAUSCH,V.A., Zur Photometrie farbiger Lichter. Licht 5 (1935), S.259-279

(55) LAGALLY,M., Vorlesungen über Vektorrechnung. 6.Aufl., Geest u. Portig, Leipzig 1959

(56) LIEBMANN,S., Über das Verhalten farbiger Formen bei Helligkeitsgleichheit von Figur und Grund. Psychol. Forsch. 9 (1927), S.300-353

(57) MACADAM,D.L., Color Discrimination and the Influence of Color Contrast on Visual Acuity. Rev.d'Optique Theor.Instrum. 28 (1949), S.161-173

(58) MYERS,K.J., INGLING,C.R., and DRUM,B.A., Brightness additivity for grating target. Vision Res. 13 (1973), S.1165-1173

(58) REEB,O., Grundlagen der Photometrie. Braun, Karlsruhe 1962

(59) REGAN,D. and TYLER,C.W., Temporal summation and its limit for wavelength changes: An analog of Bloch's law for color vision. J.Opt.Soc.Amer. 61 (1971), S.1414-1421

(60) RICHTER,M., Einführung in die Farbmetrik. de Gruyter, Berlin, New York 1976

(61) SACHS,L., Statistische Auswertungsmethoden. 3.Aufl., Springer, Berlin 1971

(62) SCHEIBNER,H., Zum Verhältnis der Photometrie zur Farbmetrik. Lichttechnik 21 (1969), S.107A-110A

(63) SCHEIBNER,H., Ober die Begriffe Farbvalenz, Farbart und Chrominanz in der Farbmetrik. Farbe 18 (1969), S.221-232

(64) SCHEIBNER,H., Chrominanz und Farbart (Chromatizität) beim Farbfernsehen. Optica Acta 17 (1970), S.143-150

(65) SCHEIBNER,H., Untersuchungen zur Protanomalie: Chrominanz und Leuchtdichte. Optica Acta 21 (1974), S.375-385

(66) SCHEIBNER,H., LUDWIG,O. und HÖBNER,C., Deuteranopie und extreme Deuteranomalie. Die Farbe, im Druck

(67) SCHEIBNER,H. and PAULUS,W., An Analysis of Protanopic CoTor Vision. In: VERRIEST,G. (Edit.): Color Vision Deficiencies IV. Karger, Basel 1978, S.206-211 (=Modern Problems in Ophtalmology, Vol.19)

(68) SCHEIBNER,H. und WOLF,E., Direkte Zerlegungen, isomorphe und homomorphe Abbildungen in der linearen Farbentheorie. Referat zum 4. Kongreß der Association Internationale de la Couleur (AIC), Berlin 1981

(69) SCHRÖDINGER,E.,Grundlinien einer Theorie der Farbmetrik im Tagessehen. Ann.Physik (VI) 63 (1920), S.397-456 u. 481-520

(70) SCHRÖDINGER,E., Ober das Verhältnis der Vierfarben- zur Dreifarbentheorie. Sitzungsber. Akad.Wiss.Wien IIa/134 (1925), S.471-490

(71) SEKULER,R., Spatial vision. Ann.Rev.Psychol. 25 (1974), s.195-232

(72) SIXTL,F., Meßmethoden der Psychologie. Beltz, Weinheim/ Bergstraße 1967

(73) SPEKREIJSE,H. and VAN DER TWEEL,L.H., Spatial contrast. Report of a workshop held in Amsterdam, January 4-9,1976. North-Holland Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York 1977

(74) TANSLEY,B.W. and BOYNTON,R.M., A Line, Not a Space, Represents Visual Distinctness of Borders Formed by Different Colors. Science 191 (1976), S.954-957

(75) TANSLEY,B.W. and BOYNTON,R.M., Chromatic border perception: The role of red- and green-sensitiv cones. Vision Res. 18 (1978), S.683-697

(76) TANSLEY,B.W. and GLUSHKO,R.J., Spectral sensitivity of longwavelength-sensitiv photoreceptors in dichromats determined by elimination of border percepts. Vision Res. 18 (1978), S.699-706

(77) TANSLEY,B.W. and VALBERG,A., Chromatic border distinctness: Not an index of hue or saturation differences. J.Opt.Soc.Amer. 69 (1979), S.113-118

(78) TESSIER,M. et BLOTTIAU,M., Variations des caracteristiques photométriques de l'oeil aux luminance photopiques. Rev.Opt. 30 (1951), S.309-322

(79) THOMA,W. und SCHEIBNER,H., Distinctness of border between colored areas versus tritanopic saturation. Pflügers Archiv 377 (1978) Suppl. R49

(80) THOMA,W. und SCHEIBNER,H., Die spektrale tritanopische Sättigungsfunktion beschreibt die spektrale Distinktibilität. Farbe+Design 17 (1980), S.49-52

(81) URBANEK,J. and FERENCZ,E., Comite d'études sur la photométrie visuelle. Rapport du secrétariat. (Comité Hongrois). 10th session - Commission Internationale de l'Éclairage, Scheveningen, 1939, 1, S.44-91

(82) VALBERG,A., Color induction: Dependence on luminance, purity, and dominant or complementary wavelength of inducing stimuli. J.Opt.Soc.Amer. 64 (1974), S.1531-1540

(83) VALBERG,A., Color Induction. A Study of Lateral Interactions in Human Vision. Diss.,Institute of Physics. University of Oslo, 1975

(84) VALBERG,A. and TANSLEY,B.W., Tritanopic purity-difference function to describe the properties of minimally distinct borders. J.Opt.Soc.Amer. 67 (1977), S.1330-1336

(85) WAGNER,G. and BOYNTON,R.M., Comparison of Four Methods of Heterochromatic Photometry. J.Opt.Soc.Amer. 62 (1972), S.1508-1515

(86) WALRAVEN,P.L., A closer look at the tritanopic convergence point. Vision Res. 14 (1974), S. 1339-1343

(87) WALSH,J.W.T., Photometry. 3rd Ed.,Constable,London 1958

(88) WARD,F. and BOYNTON,R.M., Scaling of large chromatic differences. Vision Res. 14 (1974), S. 943-949

(89) WARD,F. and TANSLEY,B.W., Increment thresholds across minimally distinct borders. J.Opt.Soc.Amer. 64 (1974), S.760-762

(90) WOLF,H., Ausgleichungsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Dümmler, Bonn 1968

(91) WRIGHT,W.D., Researches on normal and defective colour vision. Kimpton, London 1946

Herrn Prof. Dr. H. Scheibner möchte ich meinen besonderen Dank aussprechen für die stetige und engagierte Betreuung meiner Arbeit und für die vielen Stunden anregender Diskussion.

Bei den Mitarbeitern des Physiologischen Instituts II der Universität Düsseldorf möchte ich mich bedanken für die Offenheit und die tatkräftige Unterstützung, welche ich von ihrer Seite erfahren habe.

L E B E N S L A U F

20. Mai 1954	: Geboren in Hersbruck als drittes Kind von Klaus Thoma und seiner Ehefrau Gerhilt Thoma, geb. Maurer
1960 - 1964	: Besuch der Evang. Volksschule in Waldsassen
1964 - 1965	: Besuch der Oberrealschule in Tirschenreuth/Opf.
1965 - 1973	: Besuch des Holbein-Gymnasiums in Augsburg
1973 - 1974	: Grundwehrdienst bei der Bundeswehr im Sanitätsdienst
ab SS 1974	: Studium der Humanmedizin an der Universität Düsseldorf
März 1976	: Ärztliche Vorprüfung
März 1977	: Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
August 1979	: Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
Oktober 1980	: Ärztliche Prüfung
ab Aprill 1977	: Dissertation am II.Physiologischen Institut der Universität Düsseldorf unter der Betreuung von Prof. Dr. H. Scheibner